

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS, S. C.
POSGRADO

Estudio comparativo de recubrimientos para techos y el efecto sobre el confort humano y uso de energía en México

Tesis que como Requisito para obtener el Grado de Doctorado en
Ciencia y Tecnología Ambiental presenta:

Jorge Lucero Álvarez

Director de Tesis:

Dr. Ignacio Ramiro Martín Domínguez

Chihuahua, Chih. Mayo 13 del 2016.

Agradecimientos

Un agradecimiento muy especial al doctor Ignacio R. Martín Domínguez por la asesoría para el desarrollo de este trabajo.

También quiero agradecer a las siguientes personas que me brindaron su apoyo para la realización de este trabajo, ya que su aportación fue muy valiosa durante el desarrollo de estos estudios:

Ing. Rubén Castañeda Balderas

Dra. Norma Alejandra Rodríguez Muñoz

M.C. Daniel A. Martín Alarcón

Dr. Eduardo Herrera Peraza

Dr. Alfredo Campos Trujillo

Dra. María Teresa Alarcón Herrera

M.C. Jorge Escobedo Bretado

M.C. Mario Nájera Trejo

M.C. Claudia Karelly Romero Pérez

M.C. Mónica Moreno López

Esta tesis se la dedico a mis hijos Noé Sebastián y Nicole Noemí, a mis padres y a mis hermanos.

Un agradecimiento y dedicatoria especial a mi esposa Elena Gallegos Varela, por la paciencia, apoyo incondicional y cariño mostrado durante los estudios de posgrado.

Reconocimientos

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado para poder llevar a cabo el desarrollo del estudio del doctorado.

Al Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV) por permitirme forma parte integral del programa de estudios de posgrado.

A Grupo Comex, por permitirme formar parte del proyecto de investigación llevado a cabo en las instalaciones del CIMAV, y por el apoyo brindado durante el desarrollo del programa de doctorado.

Contenido

Agradecimientos	i
Reconocimientos.....	ii
Resumen.....	1
1. Introducción.....	2
1.1. Consumo de Energía para Climatización en Edificaciones	2
1.2. Confort Térmico	4
1.3. Transferencia de calor a través del techo de una edificación.	5
1.4. Estado del Arte: Reflectancia solar y emisividad infrarroja.....	7
1.5. Caso México	11
1.6. Hipótesis.....	13
1.7. Objetivos.....	13
1.8. Alcance del Estudio.	14
2. Metodología	15
2.1. Revisión bibliográfica	15
2.2. Datos climáticos.....	15
2.3. Descripción de edificaciones.....	16
2.4. Desarrollo de modelos genéricos en TRNSYS.....	22
2.5. Simulación de los equipos de climatización artificial.	26
2.6. Parámetros de salida para estimar el uso de energía y el confort térmico.	29
2.7. Variación de los parámetros de entrada.....	30
3. Resultados	32
3.1. Presentación de Resultados.	32
3.2. Cargas Térmicas.....	34
3.3. Costo Anual de la Energía.	36
3.4. Confort Térmico.	50
3.5. Discusión de los Resultados	63

4. Conclusiones.....	69
Referencias Bibliográficas	71

Resumen

Una importante, y además creciente, porción del consumo final de la energía en México es destinada a la climatización de edificaciones. Este consumo depende en gran medida de los materiales que son utilizados en la envolvente de las edificaciones, ya que algunas propiedades físicas de estos materiales afectan el flujo de calor que ocurre entre el interior de una vivienda y el ambiente. Debido a las condiciones climáticas y el tipo de construcción en México, los valores de reflectancia solar y emisividad infrarroja de recubrimientos para techos, así como en nivel de aislamiento térmico, pueden llegar a tener un efecto importante sobre el uso de energía y el confort térmico. Para evaluar este efecto se llevó a cabo una serie de simulaciones térmicas en tres tipos de edificaciones bajo condiciones climáticas de 20 ciudades de México. Con este análisis se realizó una estimación cuantitativa del ahorro en el costo anual de la energía, así como la reducción de horas no confortables que se presentan durante el año, debido al uso de aislamiento térmico y valores adecuados de reflectancia solar y emisividad infrarroja en el techo. También se determinaron las combinaciones óptimas de reflectancia solar y emisividad infrarroja para cada ciudad. Existe un importante reducción de uso de energía para la climatización en ciudades con un alto consumo de energía para enfriamiento y un escaso o nulo de consumo de energía para calefacción, como es el caso de las ciudades de la zonas térmicas 1 y 2. Mientras que los mayores efectos sobre el confort térmico ocurren en ciudades con climas donde la temperatura ambiental no es muy alejada al rango de temperaturas confortables. El aislamiento térmico presenta un limitado potencial para reducir el consumo de energía o mejorar el confort térmico si se tienen los valores adecuados de las propiedades ópticas del recubrimiento para techo.

1. Introducción

1.1. Consumo de Energía para Climatización en Edificaciones

Una función básica de la vivienda es proteger a las personas de un clima adverso, y en especial cuando se presentan temperaturas extremas que llegan a tener un efecto en el confort térmico de sus ocupantes. Cuando se presentan condiciones climáticas extremas, es necesario utilizar sistemas de climatización artificial para mantener confortable el interior de la edificación; sin embargo, estos sistemas suelen presentar un alto consumo energético. De acuerdo con el Balance Nacional de Energía de 2012, el 19% del consumo final de energía (incluyendo gas LP, leña, electricidad, gas natural y termosolar) en México correspondieron a los sectores residencial, comercial y público. De este porcentaje, el 16% es de viviendas residenciales y 3% corresponden a edificios comerciales y públicos. Se ha estimado que un promedio del 18.7% en el consumo de energía en viviendas residenciales es utilizado para calefacción y aire acondicionado (Fernández 2011), sin embargo este porcentaje varía dependiendo de las condiciones climáticas de la localidad. En el caso de la electricidad, el consumo para el acondicionamiento de aire puede superar más del 50% en climas cálidos extremos, como es mostrado en la Figura 1 (De Buen, 2011).

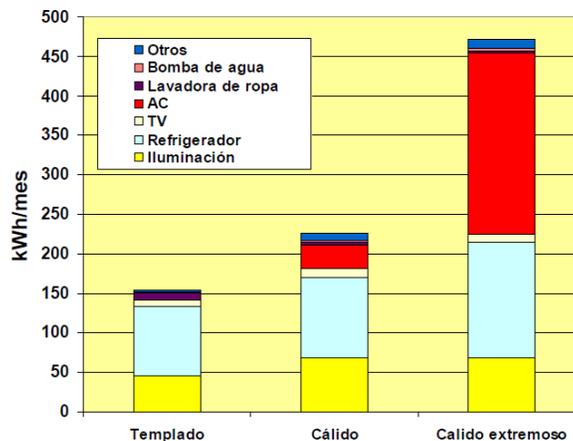


Figura 1. Estimados de los usos finales de electricidad por zonas climáticas (derecha). Fuente Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (De Buen, 2011).

El número de viviendas con aire acondicionado en el sector residencial se ha incrementado desde 1996, con un promedio anual de la tasa de crecimiento de 7.5%, mientras que el número total de viviendas en el país está aumentando en un 2.7% (Oropeza y Østergaard, 2014). Rosas-Flores y colaboradores (2011) publicaron una gráfica donde se observa el incremento en el porcentaje y consumo eléctrico de equipos de aire acondicionado hasta llegar a un 24% en 2006 (Figura 2).

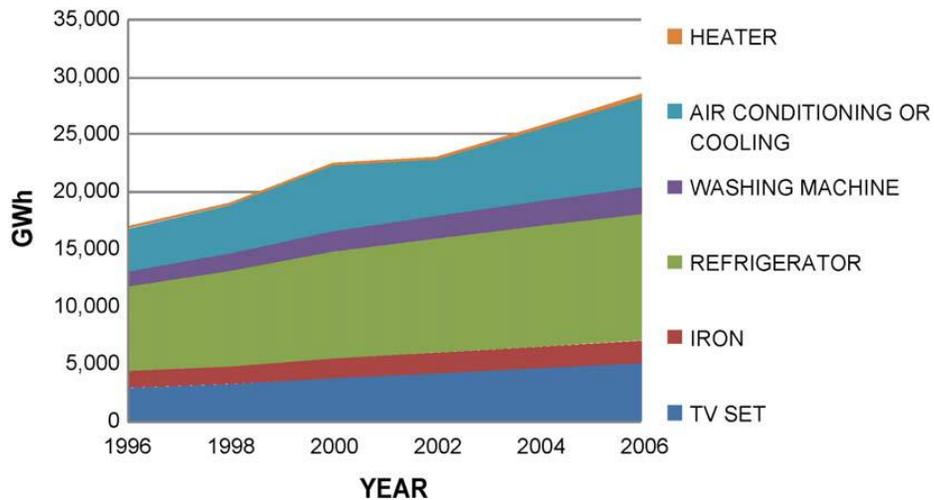


Figura 2. Consumo de energía eléctrica de los principales aparatos en viviendas urbanas (publicado por Rosas et al., 2011).

Considerando el total de edificaciones en el territorio nacional, los mayores consumos totales de energía eléctrica por tipo de edificación corresponden a edificios residenciales, en segundo lugar las escuelas y en el tercer puesto corresponde a hoteles y restaurantes (Figura 3).

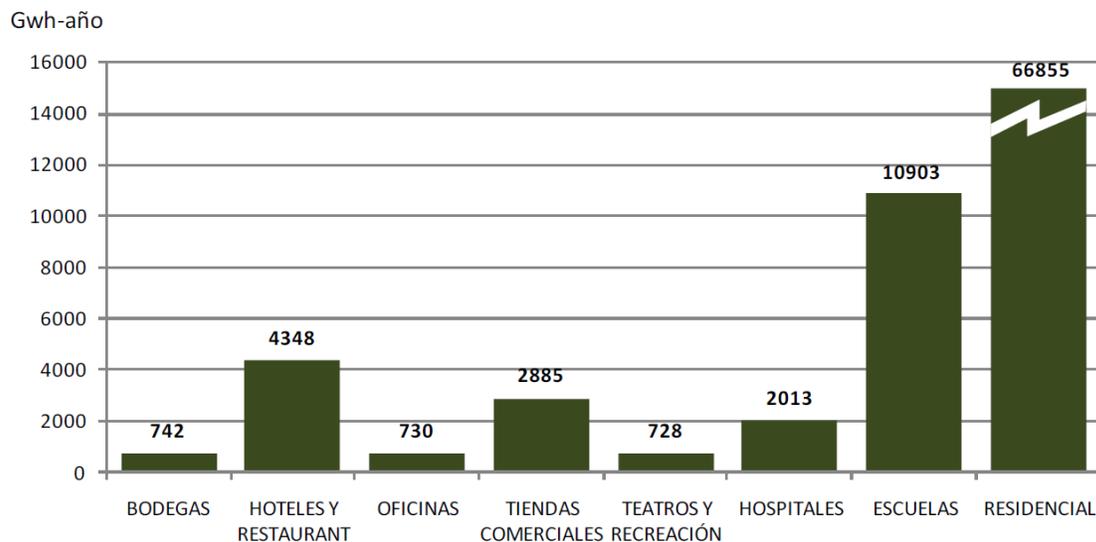


Figura 3. Consumo anual de energía eléctrica por tipo de edificación, incluyendo edificios residenciales (CMM, 2010).

El consumo de energía para la climatización de una edificación depende en gran medida de los materiales que son utilizados en la envolvente de las edificaciones, ya que algunas propiedades físicas de estos materiales afectan el flujo de calor que ocurre entre el interior de una vivienda y el ambiente.

Lo anterior indica que una importante, y además creciente, porción del consumo final de la energía en México es destinada a la climatización de edificaciones, y este consumo depende en gran medida de las características de la envolvente del edificio.

1.2. Confort Térmico

El “confort térmico” es la combinación de temperatura, humedad, grado de actividad y cantidad de ropa a las que el ser humano experimenta una sensación de satisfacción con el ambiente (ASHRAE, 2009).

Para evaluar las condiciones de confort térmico, se han desarrollado diversas metodologías, las cuales generalmente consideran a la temperatura y humedad relativa de aire en el interior de la edificación, como las principales variables que afectan el confort térmico (Evans, 2003).

Evaluar el confort térmico en el interior de una vivienda, permiten determinar la eficiencia de la envolvente del edificio cuando no se utilizan sistemas de climatización artificial, como se ha presentado en resultados de diversos trabajos (Martin-Domínguez, 2004; Campos, 2011; Barrios et al., 2011).

Las normas ISO 7730 y ASHRAE 55 definen los rangos de temperaturas que deben resultar en la satisfacción térmica de al menos el 80% de los ocupantes en un espacio. Estas normas se basan principalmente en modelos matemáticos desarrollados por Fanger y colaboradores en los 1970's, donde se definen conceptos como la Predicción del Voto Promedio PMV, por sus siglas en inglés, y la *Predicción del Porcentaje de Incomodidad*, o no confort (PPD), por sus siglas en inglés (Bojórquez-Morales et al., 2011).

El PMV es un índice que predice la respuesta promedio de un grupo grande de personas de acuerdo a una escala de sensación térmica (Tabla 1), este índice puede ser calculado a partir de diferentes combinaciones de tasa metabólica de las personas, aislamiento térmico por ropa, temperatura del aire, temperatura media radiante, velocidad del viento y humedad del aire.

El índice PPD predice el porcentaje de ocupantes que no están satisfechos con las condiciones térmicas del espacio ocupado, y es calculado en base al PMV (ASHRAE, 2009), la gráfica que relaciona el PPD y el PMV es mostrada en la Figura 4. Para un persona sedentaria o con una actividad ligera, la norma ASHRAE 55 establece un zona confortable donde hay una aceptación de al menos 80% de sus ocupantes (ASHRAE, 2009), equivalente a un $PPD < 20\%$.

Tabla 1. Escala de sensaciones térmicas (ASHRAE, 2009)

+3	Caliente
+2	Tibio
+1	Ligeramente tibio
0	Neutral
-1	Ligeramente frío
-2	Frío
-3	Helado

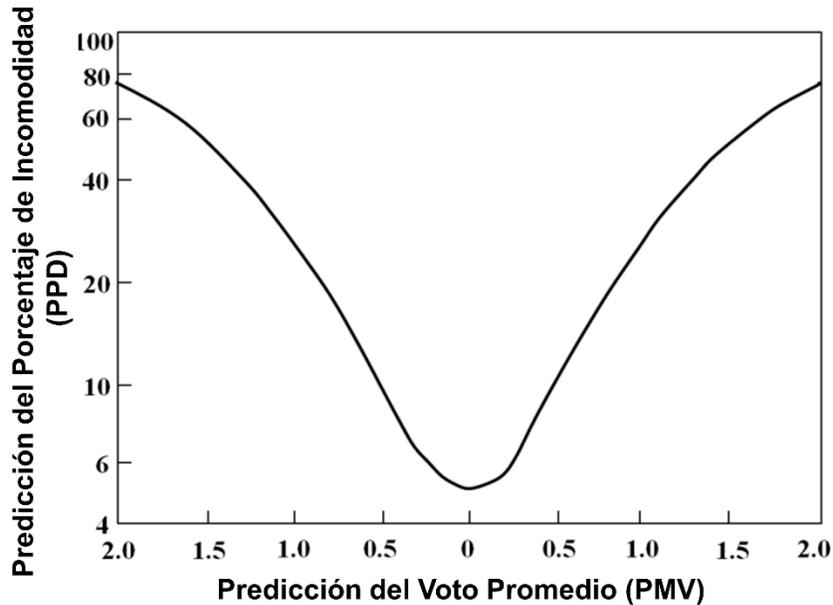


Figura 4. Gráfica que relaciona el índice PPD y el índice PMV.

Los modelos de Fanger combinan las teorías del balance de calor con la fisiología de la termorregulación para determinar un rango de temperaturas confortable para los ocupantes de edificios, y han sido ampliamente utilizados por cuatro décadas, realizando diversas modificaciones y adecuaciones a distintos casos.

1.3. Transferencia de calor a través del techo de una edificación.

Cuando se presenta un clima extremo, con una temperatura alejada al rango de confort, se establece un gradiente de temperaturas entre el aire del medio ambiente y el del interior de una edificación, como consecuencia se presenta un flujo de calor, en el cual la temperatura del aire interior de un vivienda tiende a igualarse a la temperatura del medio ambiente, fuera del rango de confort.

Durante el día, una porción de la radiación solar que incide sobre el techo y paredes es absorbida, esta ganancia de calor está en función de una sola propiedad, la reflectancia solar (RS) del recubrimiento expuesto al ambiente, y en ventanas otra porción de la

radiación es transmitida hacia el interior; también se presenta una continua pérdida de calor por interacción de radiación infrarroja entre la superficie expuesta del techo, y algunos gases presentes en la atmosfera, este flujo de calor depende de la temperatura ficticia del cielo, la cual es modelada a partir de la temperatura y humedad relativa del ambiente, de la temperatura a la que se encuentre la superficie exterior del techo, y de la emisividad infrarroja (EI) del recubrimiento del techo. La transferencia de calor por convección depende del gradiente entre la temperatura ambiental y la temperatura de la superficie expuesta del techo y paredes, además del coeficiente de flujo de calor por convección, el cual puede ser modelado a partir de la velocidad del viento (Figura 5).

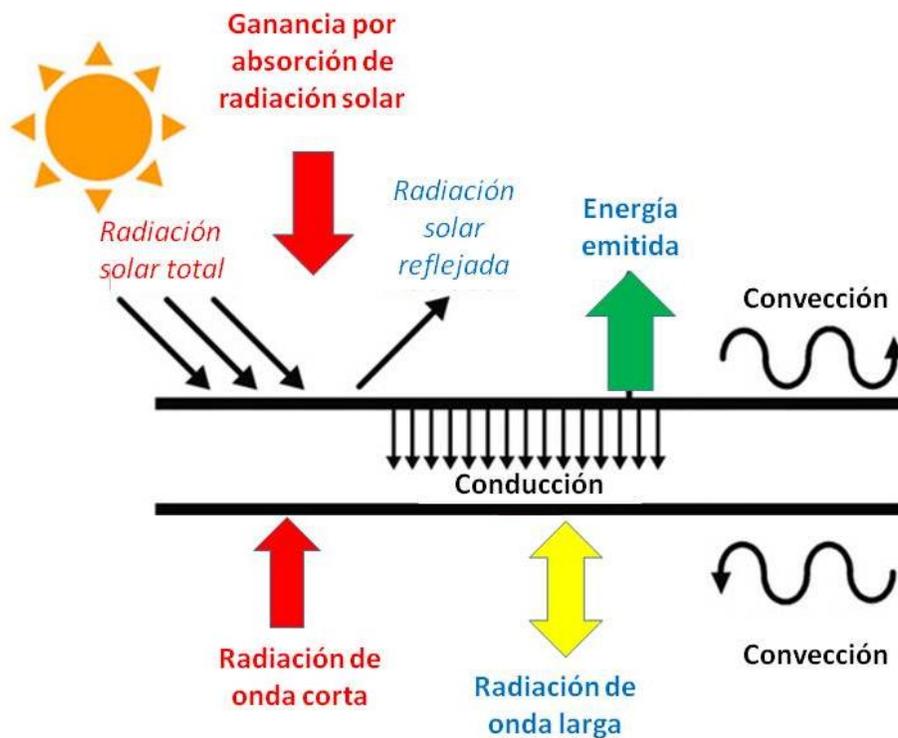


Figura 5. Mecanismos de transferencia de calor a través del techo de una edificación

El calor neto resultante una vez incorporado a la superficie exterior del techo, fluye mediante conducción a través del mismo, y dependerá de la conductividad térmica, densidad, calor específico y espesor de los diferentes materiales que conforman la estructura del techo. En la superficie interior del techo ocurre otro balance de calor, entre la conducción de calor en lado inferior de la estructura del techo, y los mecanismos de transferencia de calor por convección y radiación, que ocurran entre la superficie interior del techo y el interior de la vivienda.

1.4. Estado del Arte: Reflectancia solar y emisividad infrarroja en techos

En varios países se ha estudiado recientemente el efecto de la reflectancia solar y la emisividad infrarroja de las superficies de los techos de edificaciones sobre el consumo de energía para climatización y el confort térmico, e inclusive se ha acuñado un nuevo concepto, derivado de su importancia: los "Cool Roofs" (Figura 6).

Los techos fríos pueden ayudar a:

- ✓ Reducir el consumo anual de energía para aire acondicionado en 5% - 20% (Levinson et al. 2005)
- ✓ Disminuir la temperatura del aire exterior y la tasa de formación de smog (Rosenfeld et al. 1998; Akbari et al. 2001)
- ✓ Contribuir a mitigar el calentamiento global (10 ton de CO₂ evitados por cada 100 m² de techos color blanco) (Menon et al. 2010; Akbari et al. 2009; Oleson et al. 2010)

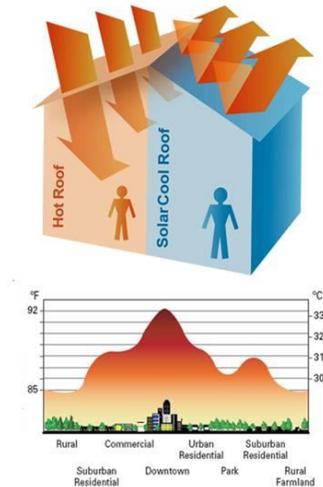


Figura 6. Ventajas de los "cool roofs".

Los "cool roofs" o techos fríos esencialmente tienen una combinación con altos valores de reflectancia solar y/o emisividad infrarroja, en lugares cálidos, además de reducir el consumo de energía para el enfriamiento de edificaciones, representan también una de las medidas propuestas para mitigar el problema de las islas de calor urbanas (Taha, 2008). Uno de los primeros estudios relacionados al efecto positivo de la reflectancia solar sobre el consumo energético, fue realizado por investigadores de la Universidad de Arizona, mediante mediciones experimentales en modelos de casas del uso de energía, utilizando diferentes recubrimientos y niveles de aislamiento térmico en los techos. En base a sus resultados se presentó una gráfica que permite determinar la combinación de albedo (reflectancia solar) y resistencia térmica conductiva (valor R) del techo (Figura 7), que producen un mismo consumo energético en una vivienda (Simpson y McPherson, 1997). En esta gráfica se puede observar como techos con bajos valores de resistencia a la conducción pero con altos valores de reflectancia solar tienen consumos similares a techos con altos valores de resistencia térmica y bajos valores de reflectancia solar, también se puede observar que la reducción del consumo de energía por incrementar la resistencia térmica a la conducción, mediante la aplicación de aislamiento térmico, es más importante cuando se tienen bajos valores de reflectancia solar.

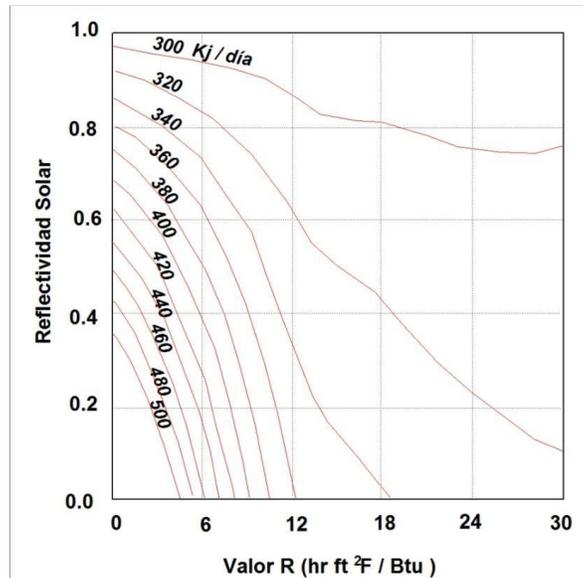


Figura 7. Predicción del uso de energía (KJ día⁻¹) para un día típico del mes de julio en Tucson, en función de la reflectancia solar y diferentes niveles de aislamiento térmico del techo (Simpson y McPerson, 1997).

Se han estimados ahorros anuales por el uso de altos valores de reflectancia solar en techos, que pueden llegar hasta 51 USD por cada 1,000 ft² (alrededor de 0.55 USD por m²) para residencias (Akbari et al., 1999) y hasta 1.14 USD por m² para edificios comerciales (Levinson y Akbari, 2010) en ciudades de Estados Unidos, mayores a 2 euros por m² en ciudades de España (Boixo et al., 2012), también se han determinado la reducciones en la emisión de CO₂ (Akbari et al., 2009), y el efecto positivo para mitigar el problema de las islas de calor urbanas (Rosenfeld et al., 1995; Taha, 2008; Santamouris, 2014).

Diversos aspectos relacionados al efecto de los cool roofs, tales como ahorros en el costo de energía, mejoramiento del confort térmico, reducción de emisiones de gases con efecto invernadero e implementación de estándares han sido estudiados y reportados para diversas regiones del mundo (Boixo et al., 2012; Bozonet et al., 2011; Zinzi y Agnoli, 2012; Dias, et al., 2014; Hamdan et al., 2012).

En algunos países se han implementado normas sobre cool roofs que especifican valores mínimos de reflectancia solar y emisividad infrarroja, o índices que incluyen ambas propiedades, de las superficies expuestas del techo de edificaciones (Akbari and Levinson, 2008; Akbari and Matthews, 2012).

Se han realizado estimaciones a través de experimentos en edificios reales (Jo et al. 2010, Takebayashi and Yamada, 2015) como en prototipos experimentales (Levinson et al., 2007; Kaska et al., 2009, Lucero et al., 2011) para determinar los cambios en la demanda de energía para climatización al variar la reflectancia solar del techo.

En ciudades de clima templado, donde hay necesidades tanto de enfriamiento como calefacción, los beneficios de techo con altos valores de RS y EI para reducir el consumo de energía durante la temporada de calor, representan también una penalización en el consumo de energía para la calefacción en la temporada de frío (Syneffa et al., 2007).

Se han realizado diversos trabajos donde se aplica la simulación dinámica para evaluar el efecto de las propiedades ópticas del techo sobre la demanda de energía y el nivel de confort térmico, generalmente un edificio base y condiciones climáticas de diversas localidades. Akbari et al. (1999) realizaron una estimación cuantitativa del impacto de la utilización de techos reflectivos en el consumo de la energía utilizada para calefacción y refrigeración, consideraron tanto edificaciones residenciales como comerciales de 11 ciudades de Estados Unidos, ellos estimaron datos del albedo en techos por medio de fotografías aéreas y utilizaron el programa DOE-2 para determinar el potencial en la disminución anual en el consumo de energía eléctrica (kWh) para enfriamiento, el aumento en el consumo de gas (GBtu), y el ahorro neto anual (millones de dólares), que se tendría si se incrementa el valor del albedo en techos. Los resultados muestran que solo para el caso de edificios residenciales en Filadelfia se presentó un incremento de la factura anual en climatización, al incrementar la reflectancia solar en los techos.

Shi y Zhang (2011) utilizaron la simulación con el programa EnergyPlus, y analizaron el efecto de la emisividad de onda larga y la reflectividad solar de la envolvente en un edificio de referencia, con respecto al ahorro energético en condiciones climáticas de diversas ciudades del mundo. En los resultados se presentan los valores óptimos de emisividad y reflectividad para obtener la mínima carga térmica en 35 ciudades. Las principales conclusiones de este trabajo son: En climas tropicales y subtropicales, el aumento en reflectividad y emisividad se traduce en una importante reducción en las cargas de enfriamiento. En climas de altiplanos de montaña elevados, y en climas fríos, se requiere tener los valores más bajos de reflectividad y de emisividad posibles para reducir los costos de calefacción. Sin embargo, en climas templados, donde se tienen periodos invernales fríos, que requieren de calefacción, y periodos de verano cálidos, en los que se utilizan equipos de enfriamiento de aire, se complica el comportamiento de las cargas térmicas en función de la reflectividad solar y la emisividad infrarroja. La Figura 8 muestra una comparación de los resultados en cuatro ciudades con diferentes condiciones climáticas.

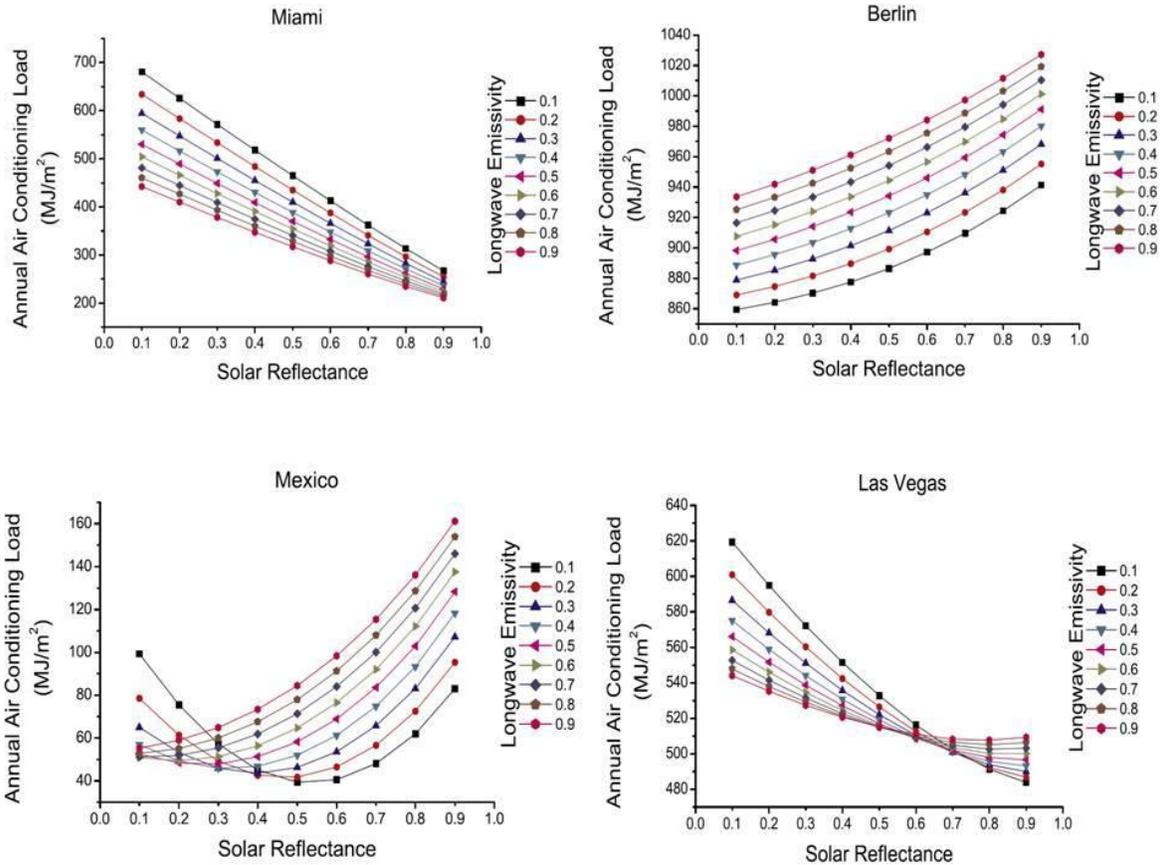


Figura 8. Resultados de simulación de envolventes de edificios con diversos valores de emisividad infrarroja y reflectividad solar vs carga térmica anual para el acondicionamiento del aire, en cuatro ciudades con diferente clima (Shi y Zang, 2011).

Gentle et al. (2011) estudiaron el efecto combinado de tres factores: albedo solar, emisividad térmica y valor R; sobre la ganancia y pérdida de calor a través del techo, mediante simulación con EnergyPlus, utilizando un modelo de vivienda sencillo, sin ventanas y con alto aislamiento térmico en paredes y piso, con un clima de Sidney, Australia. La principal conclusión es que se obtienen los más altos beneficios con techos reflectivos (alto albedo solar) cuando el valor R es pequeña, en este caso particular altos valores de reflectividad y bajos valores de R son preferidos económicamente sobre valores altos de R, debido a la contribución de pérdida radiativa nocturna aportada por R baja.

Ozel (2012) investigó la influencia de la reflectancia solar para determinar el espesor óptimo de aislamiento térmico, desde el punto de vista económico, se consideró condiciones climáticas de la ciudad de Elizag en Turquía, encontró que la reflectancia solar tiene un efecto pequeño en el espesor óptimo del aislamiento térmico y en el periodo de retorno de la inversión, pero un efecto más significativo en el ahorro de energía, los resultados de la simulación muestran que el espesor óptimo es alrededor de 0.05 m para cualquier valor de

reflectancia solar, de acuerdo a las condiciones climáticas que se utilizaron para la simulación.

1.5. Caso México

En México, debido al rango de latitudes en que se encuentra, y a que los techos de las viviendas son casi horizontales, durante las horas de mayor insolación el ángulo entre la radiación solar directa y la superficie exterior de los techos es casi normal, lo que sumado a la baja resistencia térmica de los materiales de construcción usualmente utilizados, provoca que el techo sea la parte de la envolvente donde se generan los mayores flujos de calor hacia el interior de la vivienda.

El alto ángulo de incidencia de la radiación solar sobre la superficie del techo, así como una importante interacción de la radiación infrarroja entre el techo y la atmosfera, propician que dos propiedades de la superficie exterior del techo tengan un papel importante en la magnitud del flujo de calor a través de la envolvente de la vivienda: la reflectancia solar y la emisividad infrarroja.

Recientemente se han realizados estudios en México, basados en la simulación térmica de edificaciones, relacionados al efecto de la propiedades ópticas del techo sobre la demanda de energía y confort térmico.

En los últimos años, se han implementado en México diversas normas relacionadas a la eficiencia térmica en edificaciones, entre las que se encuentran las normas NOM-008-ENER-2001 y NOM-020-ENER-2011 cuyo objetivo es limitar la ganancia de calor a través de la envolvente en edificaciones no residenciales y para uso habitacional, respectivamente, y de esta forma hacer más eficiente el uso de energía para el enfriamiento del edificio. Aunque en la metodología de estas normas no consideran la variación en la demanda de energía relacionada a la reflectancia solar y emisividad infrarroja de los materiales de las superficies de la envolvente expuestas al ambiente, hay una iniciativa para una nueva norma que trata sobre este aspecto.

En México, para efectos del análisis térmico en viviendas, la norma mexicana NMX-C460-ONNCCE-2009 define las "Zonas Térmicas" en que se divide el país, utilizando el método de grados-día (ver Tabla 2). Los requerimientos de la resistencia térmica a la conducción para la envolvente una edificación, depende de zona térmica en la que se localice. Las zonas térmicas 3 y 4 están subdivididas en 3 categorías (A, B y C) considerando el promedio anual de la precipitación fluvial.

La Figura 9 muestra la distribución de las zonas térmicas de una forma ilustrativa y es basado en un mapa publicado en la NMX-C460-ONNCCE-2009.

Tabla 2. Criterios para la clasificación de las zonas térmicas en México.

Zona Térmica	Grados-Día Refrigeración GDR10	Grados-Día Calefacción GDC18	Tipo de Region
1	> 5,000		Baja elevación, tropical, cálido humedo
2	3,500 - 5,000		Sub-tropical y arido seco
3	2,500 - 3,500	< 3,000	Altiplano Mexicano, semi-arido y templado
4	< 2,500	> 2,000	Semi-arido y templado, inviernos fríos

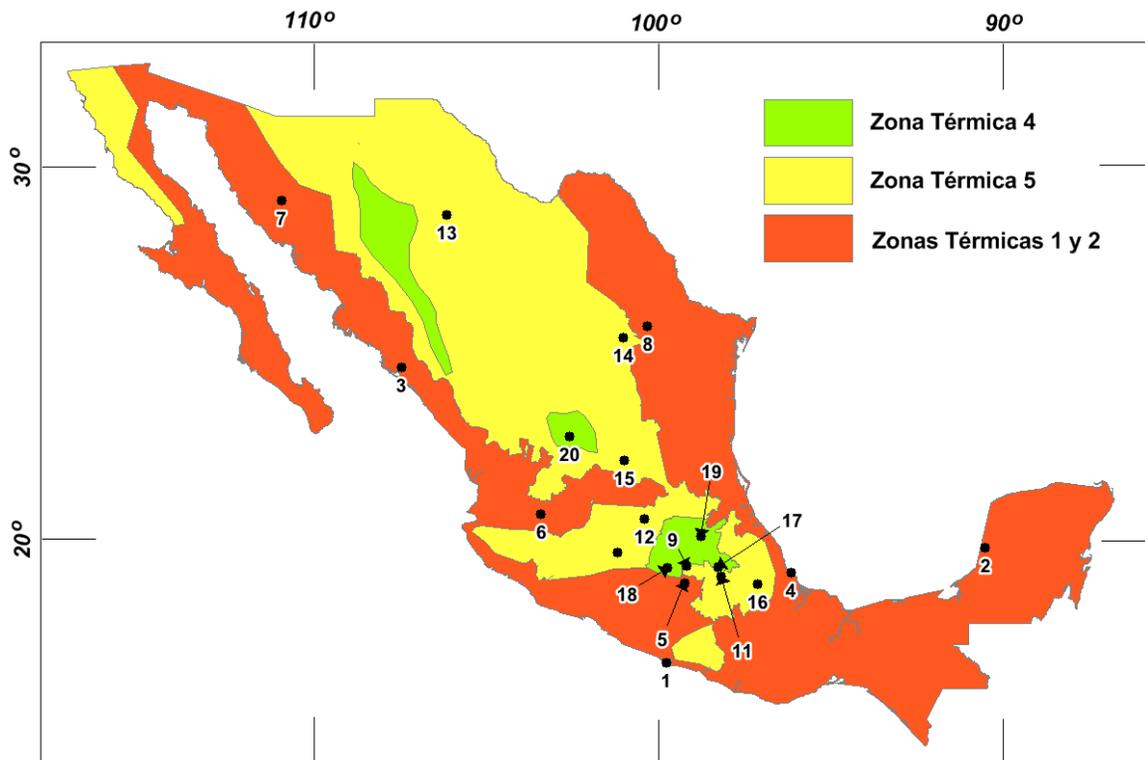


Figura 9. Límites de las zonas térmicas de México (basado en la norma NMX-C-460-ONNCCE-2009). Localización de las ciudades seleccionadas para este estudio.

Se han realizado algunos trabajos mediante simulación para evaluar el impacto de la envolvente de edificaciones sobre el consumo de energía y el confort térmico en algunas ciudades de México.

Campos (2011) realizó simulación con EnergyPlus de cuatro tipos de Vivienda de Interés Social, en seis ciudades de México ubicadas en diferentes zonas térmicas, reportando la demanda energética anual, horas de sobre-calentamiento y sobre-enfriamiento, así como las emisiones de CO₂ para cada caso. Para cada situación se evaluó un caso base, con los materiales que se utilizan actualmente en la construcción de este tipo de viviendas, un

caso económico donde el costo de utilizar eco tecnologías está dentro de los montos máximos de la Hipoteca Verde vigentes al 2011, y un caso óptimo referido a estrategias de optimización en la eficiencia energética a un mayor costo.

1.6. Hipótesis.

Dada las condiciones climáticas y estilos de construcción que se presentan en México, las propiedades termo-ópticas (reflectancia solar y emisividad infrarroja) de la superficie exterior del techo, así como el nivel de aislamiento térmico, pueden llegar a tener un efecto importante sobre el consumo de energía o nivel de confort térmico en edificaciones localizadas en ciudades de este país.

Para cada localidad del país existe una combinación óptima de los valores de reflectancia solar y emisividad infrarroja, la cual reduce al mínimo el consumo de energía para climatización artificial, así como el número de horas no confortables que se presentan durante el año. Esta combinación óptima depende las condiciones climáticas de la localidad.

La determinación de la combinación óptima de las propiedades ópticas, y la estimación cuantitativa del efecto de estas propiedades puede ser estimada mediante la simulación térmica de edificaciones.

1.7. Objetivos

Objetivo General.

El objetivo de este trabajo es investigar el efecto del aislamiento térmico, la reflectancia solar y la emisividad infrarroja en el techo de tres tipos de edificaciones, sobre el consumo de energía, para edificios que cuentan con climatización artificial, o sobre los niveles de confort térmico, para el caso de edificios que no cuentan con equipos de climatización artificial.

Para este objetivo se considerará las condiciones climáticas de 20 ciudades que sean representativas de las diferentes zonas térmicas que define la Norma Mexicana NMX-C460-ONNCCE-2009.

Objetivos Particulares.

I. Realizar una revisión bibliográfica relacionada al tema y un análisis del estado del arte. Preparar una base de datos climáticos de diferentes ciudades del territorio nacional, donde estén incluidas las diferentes zonas térmicas.

- II. Establecer una base de datos de propiedades térmicas y costos de materiales aislantes y recubrimientos para techos.
- III. Desarrollar un modelo genérico para la simulación térmica de una Vivienda de Interés Social, utilizando el paquete TRNSYS.
- IV. Realizar simulaciones del desempeño térmico de los tratamientos evaluados en viviendas de interés social, considerando las diferentes zonas térmicas de México, con dos alternativas: a) climatización artificial, siendo la variable a evaluar el consumo energético, y b) sin climatización artificial, donde se evalúen los niveles de confort térmico.
- VI. Integrar los resultados del análisis de simulación e identificar las combinaciones óptimas de las propiedades térmicas para cada una de las ciudades consideradas en este trabajo.
- VII. Elaborar reportes y artículos para divulgar los resultados y conclusiones obtenidos en este trabajo.

1.8. Alcance del Estudio.

En este trabajo se hace análisis del flujo de calor a través del techo más completo que el encontrado en la investigación bibliográfica. En el análisis paramétrico que se llevó a cabo, se varían simultáneamente las tres propiedades térmicas de los materiales de un techo común que tienen mayor influencia sobre el flujo de calor neto que ocurre una de las partes de la envolvente más importante desde el punto de vista térmico.

Este estudio abarca tanto la temporada de calor como de enfriamiento, además se utiliza un parámetro para estimar el confort térmico que es ampliamente utilizado en normas internacionales relacionadas al tema del confort térmico en edificaciones, por otra parte se estima un consumo de energía a partir del desempeño de sistemas de climatización artificial que actualmente están disponibles en el mercado.

Este estudio está limitado a los modelos de edificación seleccionados para este estudio, por lo que no debe considerarse como un consumo promedio para cualquier vivienda con dimensiones similares, ya que variaciones en el tipo de construcción, materiales en paredes y techo, orientación del edificio, relación con su entorno, capacitancia térmica, ganancias internas y desempeño de los sistemas de climatización tienen una fuerte influencia sobre los parámetros que fueron evaluados.

2. Metodología

Para alcanzar los objetivos de este trabajo se desarrollaron programas de simulación numérica en la plataforma TRNSYS, se definieron tres modelos de edificaciones y se consultaron parámetros climáticos de 20 ciudades representativas de las 4 zonas térmicas que se definen en la Normatividad Mexicana.

La metodología seguida en esta tesis se dividió en las siguientes etapas:

2.1. Revisión bibliográfica

Investigación bibliográfica para revisar trabajos anteriores que aborden la misma problemática, el análisis de esta información ha permitido tomar decisiones sobre mejoras o adecuaciones a lo planteado en la metodología, así como conocer el estado del arte relacionado al tema de tesis.

2.2. Datos climáticos

Para llevar a cabo la simulación térmica de edificaciones es necesario contar con datos climáticos representativos de la localidad donde se ubica la edificación. Estos datos incluyen a la temperatura ambiente, la humedad relativa, la velocidad del viento y radiación solar, en intervalos de tiempo relativamente pequeños (por ejemplo 1 hora), en este trabajo se utilizó el modelo que incluye TRNSYS, para generar este tipo información a partir de promedios mensuales de la temperatura, radiación solar y humedad relativa.

Se seleccionaron 20 ciudades que representan las diferentes zonas térmicas de México, estas ciudades se encuentran enlistadas en la Tabla 3.

Tabla 3. Ciudades consideradas para realizar la simulación térmica, y que representan las diferentes zonas térmicas de México.

Zona 1	Zona 2	Zona 3A	Zona 3 (B y C)	Zona 4
1. Acapulco	5. Cuernavaca	9. México D.F.	13. Chihuahua (3B)	17. Tlaxcala (4A)
2. Campeche	6. Guadalajara	10. Morelia	14. Saltillo (3B)	18. Toluca (4A)
3. Culiacán	7. Hermosillo	11. Puebla	15. S. L. Potosí (3B)	19. Pachuca (4B)
4. Veracruz	8. Monterrey	12. Querétaro	16. Orizaba (3C)	20. Zacatecas (4C)

Los promedios mensuales de la temperatura media, humedad relativa y velocidad del viento para 73 ciudades de México fueron obtenidos de la página del Sistema Meteorológico Nacional (SMN, 2010), estos resúmenes de datos climáticos fueron obtenidos del periodo 1981-2000, mientras que el promedio mensual de la irradiación solar de esta lista de ciudades fue obtenida de la página web del Solar Radiation Data Service (SoDA, 2012).

Se estimaron temperaturas promedio del suelo para los meses de enero y julio, en base a mapas de temperatura del suelo generados a partir de imágenes de satélite (MODIS, 2012), con estos datos se utilizó un módulo en TRNSYS para simular la temperatura del suelo durante todo el año. Se consideraron tres grupos, el grupo A (Toluca y Orizaba) con una temperatura promedio de 20°C y un rango de 5°C, el grupo C (Acapulco, Culiacán, Hermosillo y Veracruz) con temperatura promedio de 27.5°C y un rango de 4; y el grupo B (resto de las ciudades) con una temperatura promedio de 22.5°C y un rango de 5°C.

2.3. Descripción de edificaciones

Se consideran tres tipos de edificación, las cuales serán referidas como "*Vivienda de Interés Social*", "*edificio residencial*" y "*edificio no residencial*". La Vivienda de Interés Social fue definida en base a un modelo real de un fraccionamiento ubicado en Querétaro, y cuyas forma y dimensiones fueron obtenidas a partir de la planta y fachada arquitectónica de la vivienda. La información para los edificios residencial y no residencial fueron obtenidos a partir de un reporte preparado para WinBuid Inc, y corresponde a los modelos de edificaciones utilizados para el diseño de las normas mexicanas NOM-008-ENER-2001 y NOM-020-ENER-2011, ambas referentes a la eficiencia térmica de edificaciones a través del incremento en la resistencia térmica a la conducción en la envolvente de los edificios.

2.3.1. Vivienda de Interés Social

La vivienda utilizada como caso base tiene una superficie de 48 m² y un volumen de 144 m³, cuyas dimensiones consideradas fueron de 6 m de ancho, 8 m de largo y 3 m de altura (Figura 10), la paredes consisten de block hueco de concreto, con un 20% de ventanas con vidrio sencillo en las paredes N y S.

El techo es una losa de concreto de 15 cm, con acabados de yeso al interior, y recubrimiento acrílico al exterior.

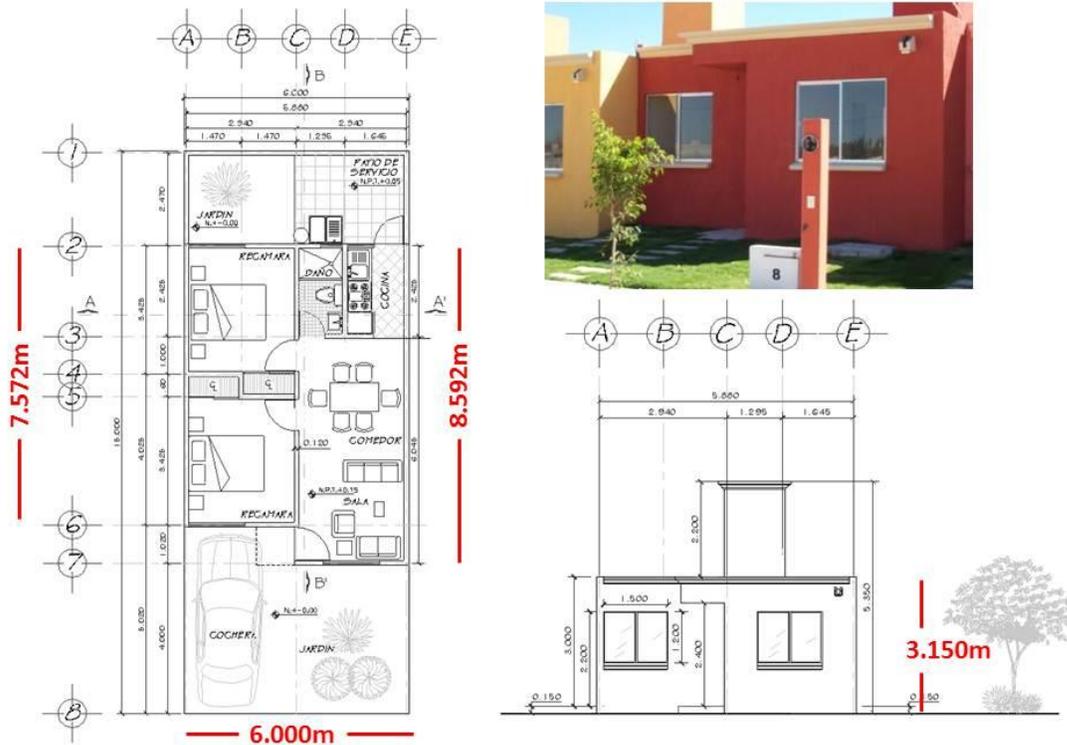


Figura 10. Planta y perfil de la Vivienda de Interés Social utilizada como caso base.

La ocupación de la vivienda es de 4 personas con un horario de 3 PM a 8:00 AM entre semana, y todo el fin de semana. Se consideraron las ganancias de calor por los ocupantes, la iluminación y aparatos domésticos, además se supuso fugas de aire de 0.5 intercambios de aire por hora, y una ventilación mecánica de 1.0 1/h. Otros parámetros requeridos para la simulación térmica están enlistados en la Tabla 4.

Durante la simulación para determinar las cargas térmicas y el consumo de energía, la temperatura del interior de la vivienda fue controlada para que se mantuviera en un rango de confort entre los 20°C y 25°C.

Los materiales y espesores que se consideraron para el techo, paredes y piso, así como las propiedades físicas están enlistados en la Tabla 5. Para las ventanas se consideró un vidrio sencillo cuyos valores de las propiedades termo-físicas están incluidas en una librería del paquete TRNSYS (valor U de 5.68 W/m²·K y transmitancia solar de 85.5%).

Tabla 4. Parámetros necesarios para la simulación térmica de edificaciones.

Dimensiones de la vivienda	
Altura	3 m
Ancho	6 m
Largo	8 m
Fracción de ventanas	
Lado N	22 %
Lado E	0 %
Lado W	0 %
Lado S	20 %
Rotación del Edificio:	0 °
Infiltración y ventilación	
Fugas de aire	0.2 1/h
Ventilacion Mecanica	
vivienda ocupada	1 1/h
vivienda desocupada	0 1/h
Calefacción y Refrigeración	
Parte radiativa de calefacción	0
Temperatura de control calef.	20 °C
Temperatura de control refrig.	25 °C
Humedad Relativa de control calef.	30 %
Humedad Relativa de control refrig.	70 %
Ganancias e Iluminación	
Ganancias específicas	14 W·m ²
Número de ocupantes	4
Ganacia por Iluminación	5 W·m ²
Fracción de ganacia por convección	50 %

Tabla 5. Propiedades térmicas de los materiales de construcción para la Vivienda de Interés Social.

Elemento constructivo	Material	Espesor l [m]	Cond. Térmica λ [kJ/h m K]	Calor Esp. Cp [kJ/kg*K]	Densidad ρ [kg/m3]
Piso	Ceramica	0.01	3.769	0.8	2500
	Mezcla	0.01	2.268	0.84	2000
	Concreto	0.15	6.264	0.84	2300
Pared	Yeso aplanado	0.02	1.34	0.34	800
	Block de concreto	0.15	5.88	0.92	1700
	Acabado mortero	0.025	3.14	0.84	1860
Techo	Yeso aplanado	0.02	1.3392	1	800
	Concreto	0.15	6.264	0.84	2300
	Impermeabilizante	0.002	0.612	0.8	1127

2.3.2. Edificio Residencial

El modelo base para el edificio residencial es una vivienda de dos niveles, con una superficie total de construcción aproximadamente de 100 m² (Figura 11). El valor del albedo, o reflectancia solar, para las paredes es de 0.1. La vivienda es ocupada por 4 personas, y el horario de operación es de Lunes a Viernes entre las 0:00 a 8:00 horas y 15:00 a 24:00 horas, e incluye las 24 horas del Sábado y Domingo. Se consideraron ganancias por equipo eléctrico e iluminación y una ocupación de las personas, los parámetros para la simulación son enlistados en la Tabla 6.

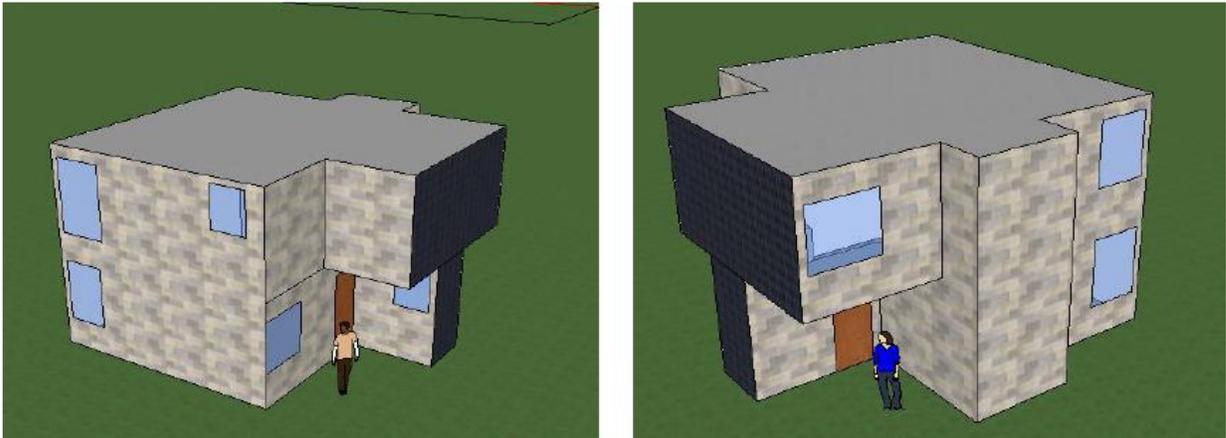


Figura 11. Vista frontal y trasera del edificio residencial (fuente Álvarez 2013)

Este edificio se modeló con dos plantas y una superficie de construcción de 50 m² para cada planta, se consideró la geometría del modelo para el sombreado de las ventanas.

Las propiedades de los materiales, así como el arreglo de los materiales en la envolvente del edificio residencial son mostradas en la Tabla 7.

Para las ventanas se consideró un vidrio sencillo cuyos valores de las propiedades termo-físicas están incluidas en una librería del paquete TRNSYS (valor U de 5.68 W/m²·K y transmitancia solar de 85.5%).

Tabla 6. Parámetros necesarios para la simulación térmica de edificaciones.

Dimensiones de la vivienda	
Se modelaron 2 pisos con una superficie de 50m ² para cada piso:	
Altura	2.5 m
Ancho	6.25 m
Largo	8 m
Dimensiones de las ventanas	
Lado N	5.16 m ²
Lado E	1.62 m ²
Lado W	0.75 m ²
Lado S	5.50 m ²
Infiltración y ventilación	
Fugas de aire	2 1/h
Sin Ventilación Mecánica	
Calefacción y Refrigeración	
Parte radiativa de calefacción	0
Temperatura de control calef.	20 °C
Temperatura de control refriger.	25 °C
Humedad Relativa de control calef.	30 %
Humedad Relativa de control refriger.	70 %
Ganancias e Iluminación	
Ganancias específicas	28 W·m ²
Número de ocupantes	4
Ganancia por Iluminación	10 W·m ²

Tabla 7. Propiedades térmicas de los materiales de construcción (edificio residencial y no residencial).

Elemento constructivo	Material	Espesor l [m]	Cond. Térmica λ [kJ/h m K]	Calor Esp. Cp [kJ/kg*K]	Densidad ρ [kg/m ³]
Piso	Azulejo	0.01	4.0896	0.795	2600
	Concreto	0.1	6.264	0.84	2300
Entrepiso	Azulejo	0.01	4.0896	0.795	2600
	Concreto	0.1	6.264	0.84	2300
	Yeso aplanado	0.015	1.3392	1	800
Pared	Yeso aplanado	0.015	1.3392	1	800
	Ladrillo	0.14	2.916	0.8	1600
	Acabado mortero	0.015	2.592	0.837	1890
Techo	Yeso aplanado	0.015	1.3392	1	800
	Concreto	0.1	6.264	0.84	2300
	Impermeabilizante	0.02	0.612	0.8	1127

2.3.3. Edificio No Residencial

El modelo para el caso base consiste de un edificio de tres plantas con una superficie de 625 m² para cada planta, con una relación de aspecto de 1:1, 25 m por lado (Figura 12), la relación de ventana/paredes es de 40%. El valor del albedo, o reflectancia solar, para las paredes es de 0.25. Se consideraron ganancias internas de calor por equipo eléctrico, iluminación y ocupación de las personas, con un horario de operación es de Lunes a Viernes entre las 8:00 AM a 10:00 PM. También se contempló necesidades de ventilación durante la ocupación del edificio de acuerdo a la norma ASHRAE 62 con un valor de 0.043 m³/min·m² (Halverson et al, 1994). Algunos parámetros para la simulación son enlistados en la Tabla 8.

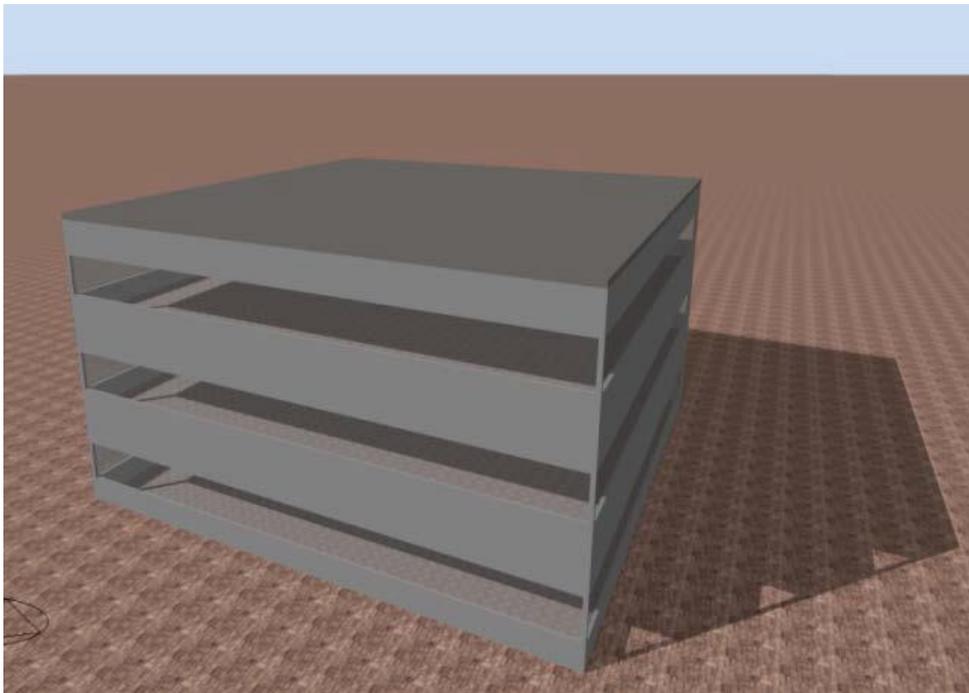


Figura 12. *Perspectiva del edificio no residencial (fuente Álvarez 2013).*

Este edificio se modeló con tres zonas térmicas, una para cada planta y una superficie de construcción de 625 m² para cada planta, no se consideró sombreado en las ventanas.

Las propiedades de los materiales, así como el arreglo de los materiales en la envolvente del edificio residencial son similares al del edificio residencial y son mostradas en la Tabla 7.

Para las ventanas se consideró un vidrio sencillo cuyos valores de las propiedades termo-físicas están incluidas en una librería del paquete TRNSYS (valor U de 5.68 W/m²·K y transmitancia solar de 85.5%).

Tabla 8. *Parámetros necesarios para la simulación térmica de edificaciones (edificio no residencial).*

Dimensiones del edificio	
3 pisos con una superficie de 625m ² para cada piso	
Altura	4 m
Ancho	25 m
Largo	25 m
Dimensiones de las ventanas	
Lado N	40.00 m ²
Lado E	40.00 m ²
Lado W	40.00 m ²
Lado S	40.00 m ²
Infiltración y ventilación	
Fugas de aire	1 ACH
Ventilación Mecánica (durante operación)	0.043 m ³ /min·m ²
Calefacción y Refrigeración	
Parte radiativa de calefacción	0
Temperatura de control calef.	20 °C
Temperatura de control refig.	25 °C
Humedad Relativa de control humidificación	30 %
Humedad Relativa de control deshumidificación	65 %
Ganancias e Iluminación (durante operación)	
Ganancias específicas	8 W/m ²
Densidad ocupacional	9 m ² /persona
Ganancia por Iluminación	16 W/m ²

2.4. Desarrollo de modelos genéricos en TRNSYS

Los modelos que se define en TRNSYS, consiste de una serie de módulos que requiere de valores de entrada, y que representan un programa que realiza diversos procedimientos y cálculos, los resultados representan las variables de salida de cada programa. Estas entradas y salidas de cada módulo son interconectadas, lo que permite determinar la información necesaria para llevar a cabo la simulación del comportamiento térmico de un edificio, el cual es descrito en un programa denominado TRNBUILD, en este mismo programa se llevan a cabo los balances de energía necesarios para determinar el uso de energía para la climatización artificial, así como las condiciones físicas necesarias para determinar el nivel de confort térmico.

Para cada tipo de edificación se construyeron tres modelos en TRNSYS:

- **Cargas térmicas**, donde se controla la temperatura y se determina "carga anual" que consiste en la energía requerida para mantener la temperatura el aire interior

en un rango de confort durante todo el año, así como la "carga pico", que representa el máximo valor de la energía requerida para mantener el rango de confort, y es utilizada para el dimensionamiento del sistema de climatización artificial.

- **Confort térmico**, donde se deja libre la temperatura y se estima el porcentaje de horas al año en el que el valor de la predicción del porcentaje de personas no satisfechas (PPD), es mayor al 20%, 50% y 80%.
- **Consumo de energía**, en este modelo se simula un sistema de climatización artificial que mantiene la temperatura del aire interior de la edificación en un rango de confort, y se calcula la energía utilizado por el sistema de climatización artificial.

Durante la simulación para determinar las cargas térmicas y el consumo de energía, la temperatura del interior de la vivienda fue controlada para que se mantuviera en un rango de confort entre los 20°C y 25°C, en el caso de la simulación con equipos de climatización artificial se utilizó un banda de +/- 1°C para cada temperatura de control.

Tanto la simulación para determinar las cargas térmicas, como para evaluar el confort térmico, se consideraron intervalos de 1 hora, mientras que para estimar el consumo de energía el intervalo se redujo a 15 minutos, con el fin tener una mayor similitud con el funcionamiento real de los equipo de climatización artificial.

El coeficiente de transferencia por convección, en las superficies exteriores de paredes y techo, fue modelado de acuerdo a Emmel y colaboradores (2007) quienes publicaron modelos para viviendas de baja altura, en base la simulación del flujo de aire en una edificación representativa. Para el edificio no residencial se consideró los modelos promedio presentado por Palyvos (2008). En las superficies interiores se consideró un valor constante de 11 kJ/m²K. Los modelos utilizados son mostrados en la Tabla 9.

Tabla 9. Modelos del coeficiente de transferencia de calor en función de la velocidad del viento.

Modelos de Coeficiente de Transferencia de Calor Por Convección		
Elemento	Emmel et al 2007	Palyvos 2008
Pared Barlovento (Lado Sur)	5.15V0.81	7.4+4.0V
Pared Sotavento (Lado Norte)	3.54V0.76	4.2+3.5V
Pared Paralela a dirección del viento (Lados Este y Oeste)	4.78V0.71	5.7+3.8V
Techo	5.11V0.78	5.8+4.1V

Para los modelos de cargas térmicas y consumo de energía no se consideraron los aspectos relacionados a la humedad relativa del aire en el interior de los edificios, como son la carga térmica latente, o el consumo de energía para la humidificación y des-humidificación.

Para determinar el PPD se consideró un factor de vestido igual a 0.75 clo (ropa ligera: *camisa manga corta y pantalón largo*), un grado de metabolismo de 1.5 met (*de pie, haciendo un trabajo ligero*) y un velocidad relativa del aire de 0.2 m/s.

En la Figura 13 se muestra un diagrama general de los modelos de simulación

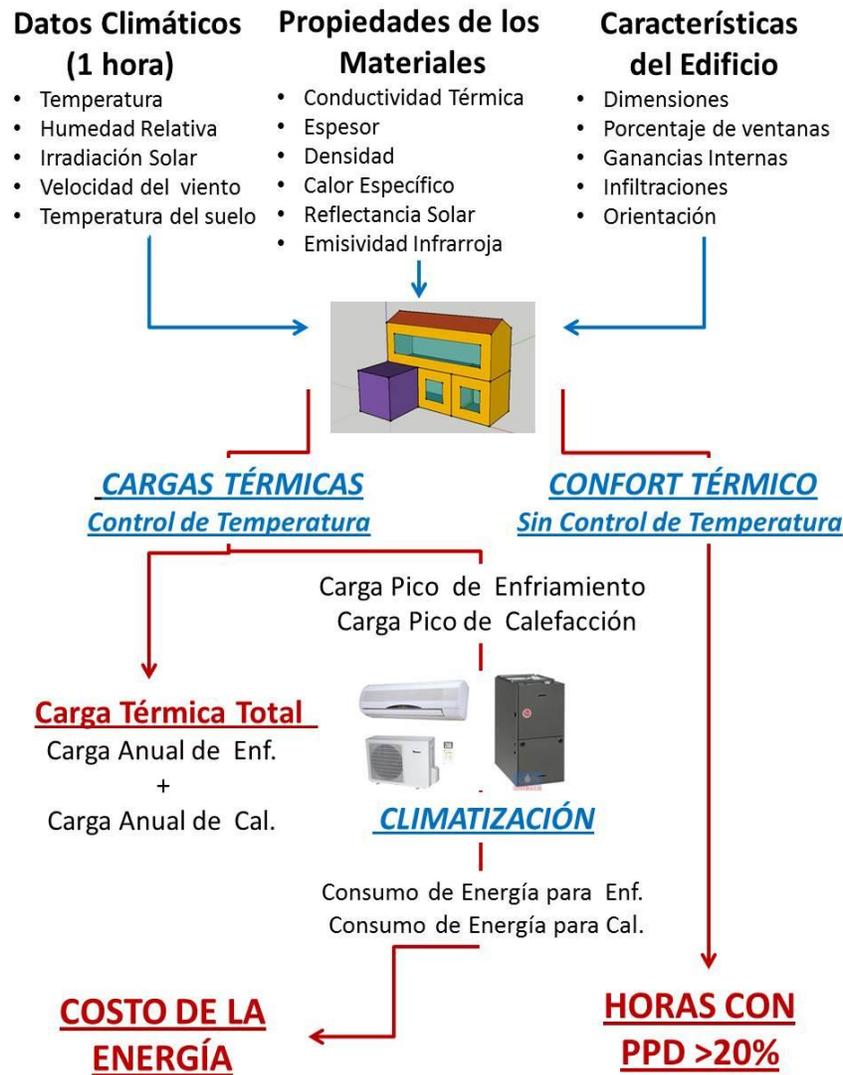


Figura 13. Esquema general de simulación térmica de los tres tipos de edificaciones

La Figura 14 representa el modelo de TRNSYS utilizado para determinar el consumo de energía y ejemplifica el funcionamiento de este software, los datos climáticos (a) de radiación solar sobre la horizontal, temperatura del aire exterior y velocidad del aire son generados a partir módulo *Type 54*, a partir de la radiación solar sobre la horizontal, el módulo *Type 16c* calcula la radiación solar en superficies con las orientaciones que presentan los muros de la edificación, mientras que el módulo *Type69b* estima la

temperatura ficticia del cielo. Algunos detalles de los edificios que influyen sobre el sombreado, así como la simulación de una ventilación natural a través de ventanas (b) pueden también ser considerados en TRNSYS. La temperatura del suelo (c) puede ser modelada a partir de una temperatura promedio anual y el rango de variación de esta temperatura que ocurre durante el año. Toda esta información es necesaria para que el programa TRNBUILD (módulo donde se configura el edificio) realice los balances de energía (d), en este mismo módulo se realiza la descripción del edificio, incluyendo las diferentes zonas térmicas en que se divide el edificio, las dimensiones y materiales de construcción de los muros, las propiedades térmicas de estos materiales, las ganancias de calor internas, y la entrada/salida de energía térmica mediante el intercambio de aire con el exterior.

Los modelos matemáticos para simular los equipos de climatización artificial fueron integrados en módulos adicionales (e), para el funcionamiento automatizado de los sistemas de climatización artificial, se consideró un módulo que realiza la función de un termostato (f). El funcionamiento de los sistemas de enfriamiento y calefacción son simulados en módulos que incluyen TRNSYS (g y h), estos permiten determinar la velocidad, temperatura y humedad relativa de aire frío (enfriamiento) o del aire caliente (calefacción) que regresa al edificio desde los sistemas de climatización artificial, todos los resultados de interés son procesados por diversos módulos adicionales (i) y finalmente los resultados son extraídos mediante el módulo *Type 25c* (j).

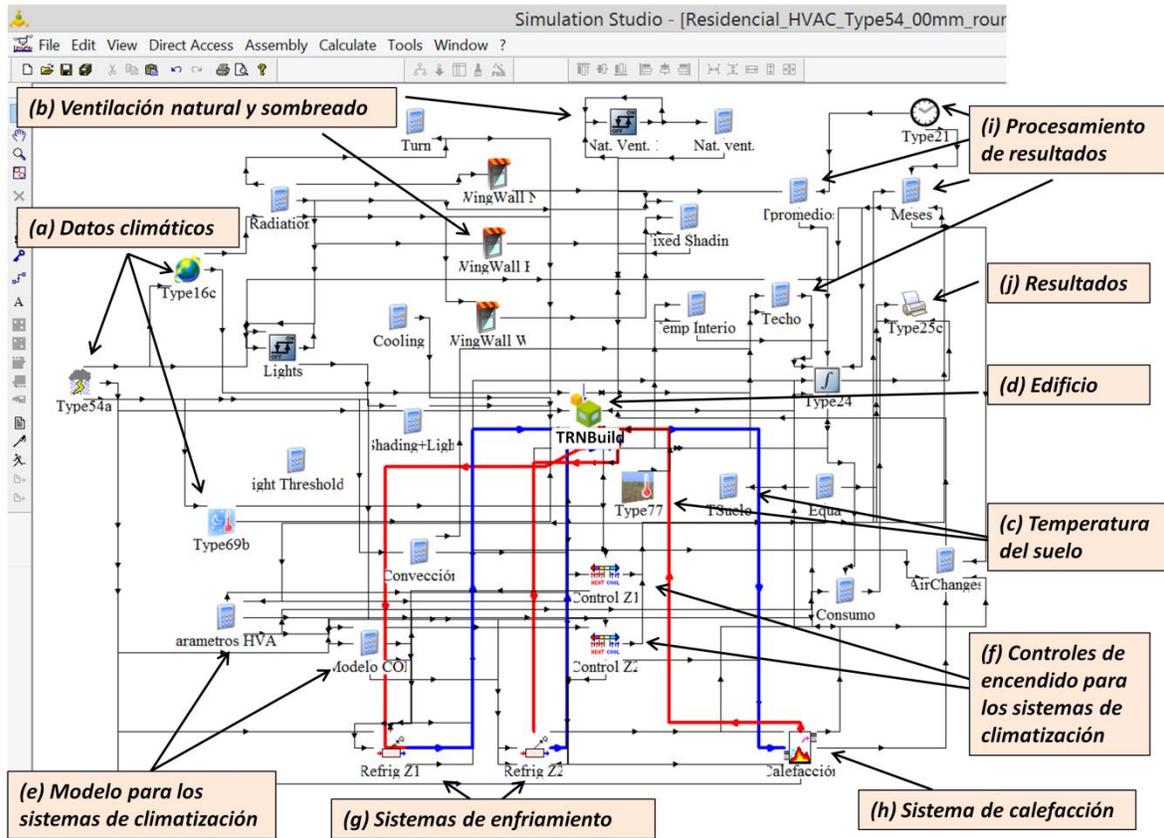


Figura 14. Plataforma para la simulación del uso de energía del edificio residencial en TRNSYS.

2.5. Simulación de los equipos de climatización artificial.

Para el dimensionamiento del equipo de climatización artificial, se utilizó una *carga pico de diseño*, que fue definida en base al valor máximo de la carga térmica instantánea que se presentó durante el año, tanto para los periodos de enfriamiento como de calefacción. En el caso de la Vivienda de Interés Social, se consideraron equipos tipo minisplit frío-calor, los cuales son comercialmente disponible con valores de capacidad nominal muy similares tanto para el enfriamiento como para la calefacción. La capacidad nominal del equipo fue definida en base al valor máximo entre la *carga pico de enfriamiento* y la *carga pico de calefacción*.

Para los edificios residencial y no residencial se consideró, durante el periodo de enfriamiento un sistema de refrigeración tipo minisplit y unidad paquete respectivamente. Un sistema de calefacción central fue simulado para el periodo de calefacción en ambos edificios.

Los equipos de enfriamiento de las tres edificaciones consisten en sistemas de refrigeración, y en el caso de la Vivienda de Interés Social se utiliza una bomba de calor para la calefacción. Las capacidades "nominales" de los equipos comercialmente disponibles utilizan unidades de BTU/h o bien "Toneladas de Refrigeración" (T.R.), una tonelada de refrigeración equivale a 12,000 BTU/h, por lo que se utilizaron las unidades de T.R. para el dimensionamiento de estos equipos. Los sistemas de refrigeración y bomba de calor funcionan con energía eléctrica que alimentan a uno o varios compresores, un sistema de control electrónico así como ventiladores.

Las capacidades de los sistemas de calefacción central considerados para los edificios residencial y no residencial, son disponibles en unidades de BTU/h. Estos sistemas funcionan con una caldera de gas que calienta aire, así como un sistema de ventiladores que recirculan el aire, y un sistema de control electrónico. Estos equipos consumen tanto energía eléctrica como gas natural o LP.

Tres datos principales de estos equipos son requeridos para la simulación: la capacidad de enfriamiento o calefacción (expresada en KJ/h), el flujo volumétrico del aire (en kg/h) y el consumo de energía por unidad de tiempo en el que opera el equipo.

Para el caso de los sistemas de refrigeración y bomba de calor, la capacidad real de enfriamiento o calefacción depende del desempeño que tiene el equipo, y este desempeño está en función de la temperatura del aire exterior. La eficiencia de estos sistemas se establece mediante un factor denominado SEER (*seasonal energy efficiency ratio*), el índice SEER es el resultado de dividir la capacidad nominal de enfriamiento (BTU/h) entre la potencia de entrada (W). El valor de SEER considerado para el equipo de refrigeración es de 13.

Para modelar la capacidad real de estos equipos se revisaron fichas técnicas de diversos equipos tipo minisplit y unidad paquete, y se concluyó que la capacidad real puede modelarse con una ecuación lineal en función de la temperatura exterior y la capacidad nominal de los minisplit. De igual forma el flujo másico del aire y el consumo de energía pueden ser modelados a partir de la capacidad nominal del equipo. Las Figuras 15 y 16 muestran ejemplos de estos modelos para determinar la capacidad real de enfriamiento (Figura 15) y el flujo másico del aire y consumo de energía (Figura 16). Una metodología similar fue utilizada para el caso de la bomba de calor.

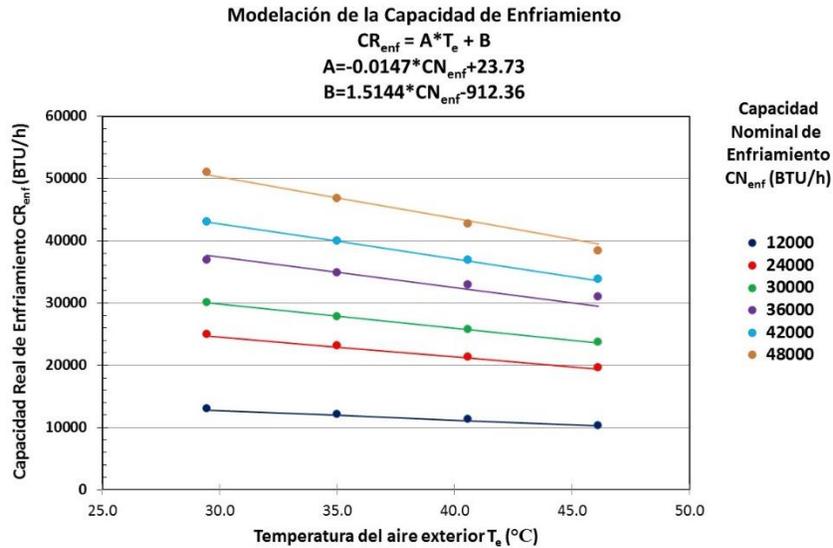


Figura 15. Modelo de regresión para determinar la capacidad real de enfriamiento obtenidos a partir de datos técnicos.

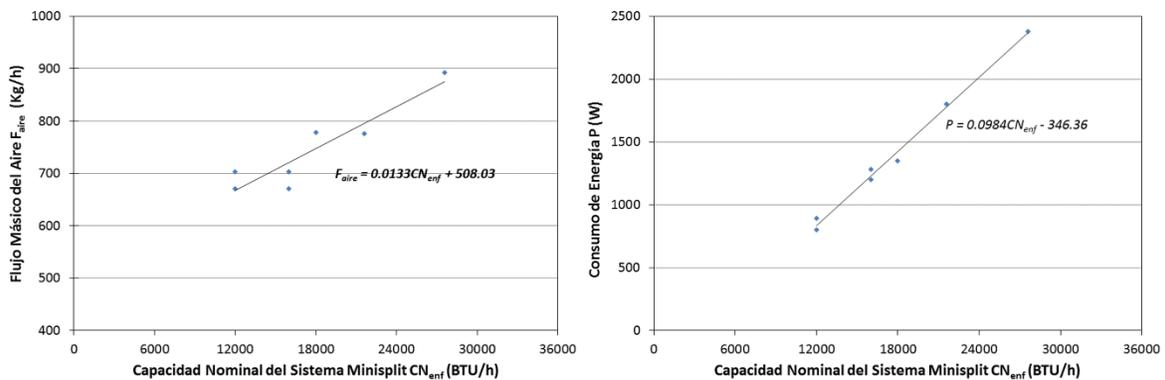


Figura 16. Ejemplos de modelos lineales para estimar el flujo másico del aire y el consumo de energía de los equipos minisplit, datos mostrados en las gráficas fueron obtenidos a partir de fichas técnicas de aparatos comercializados en México.

La capacidad de calefacción de los sistemas de calefacción central utilizados para los edificios residencial y no residencial está definida en base a una eficiencia del 80%. El flujo másico del aire y el consumo de energía eléctrica también fueron determinados mediante modelos de regresión lineal a partir de datos obtenidos en fichas técnicas. El consumo de gas es basado en la capacidad nominal de los aparatos.

2.6. Parámetros de salida para estimar el uso de energía y el confort térmico.

2.6.1. Costo Anual de la Energía.

Dado que los modelos del Edificio Residencial y no residencial cuentan con sistemas de climatización que requieren diferentes recursos energéticos, con los equipos de climatización considerados durante el verano se consume electricidad y durante el invierno se requieren tanto energía eléctrica como un combustible como el gas natural. Para determinar el uso de energía, se optó por determinar el costo del recursos energético necesario para mantener climatizada la edificación durante todo el año, definido en este trabajo como el “Costo Anual de la Energía” (CAE).

Con la simulación en TRNSYS se calculó el consumo anual de energía eléctrica del sistema de refrigeración, así como el de energía eléctrica y gas natural para el sistema de calefacción, en base al tiempo de operación de los sistemas de climatización artificial.

El costo de la energía fue estimado en base al precio promedio de la energía eléctrica para el sector comercial para los meses de Enero a Mayo del 2014, publicado en la página de la Secretaría de Energía (SENER, 2014); así como el precio promedio del gas natural para el sector comercial durante los meses de Enero a Julio del 2014 (CRE, 2014), los datos del precio de la electricidad y gas natural son mostrados en la Tabla 10.

El CAE fue determinado sumando el costo de la energía para enfriamiento y el costo de la energía para calefacción, siendo ambos determinados en pesos mexicanos.

Tabla 10. Precio promedio de la electricidad y gas natural en México para el primer semestre del 2014.

Precio Medio de Electricidad (centavos/kWh)		
Mes	Domestico	Comercial
ene-14	132.82	303.53
feb-14	131.8	303.84
mar-14	126.16	306.46
abr-14	126.89	302.81
may-14	119.37	304.37
Promedio	127.408	304.202

Fuente SENER: <http://egob2.energia.gob.mx/portal/electricidad.html>

Precio Medio del Gas Natural (Pesos/GigaJoule)		
Mes	Domestico	Comercial
ene-14	176.93	105.83
feb-14	178.24	107.14
mar-14	181.37	110.26
abr-14	179.08	107.98
may-14	185.48	113.91
jun-14	191.81	120.78
jul-14	177.98	106.27
Promedio	181.56	110.31

Fuente Comisión Reguladora de la Energía: <http://www.cre.gob.mx/articulo.aspx?id=169>

2.6.2. Porcentaje de Horas No Confortables.

Para evaluar el confort térmico, el módulo de TRNSYS que realiza la simulación de edificaciones cuenta con una variable de salida para determinar el porcentaje de personas no satisfechas o PPD. Durante las simulaciones se cuantificó las horas no confortables considerando un valor de PPD mayor al 20%.

Se calculó el “Porcentaje de Horas No Confortables” (PHNC) presente durante el año, considerando que el año tiene 8,760 horas, en base las horas no confortables (con PPD mayor al 20%) obtenidas en las simulaciones.

2.7. Variación de los parámetros de entrada

Tanto al emisividad infrarroja como la reflectancia solar fueron variadas sistemáticamente en un rango de valores entre 0.1 a 0.9, se utilizaron incrementos en ambas propiedades de 0.1 para los modelos de cargas térmicas y confort térmico, y de 0.2 para el modelo de consumo de energía.

Además del caso base se consideraron dos niveles de aislamiento térmico aplicado sobre la losa de concreto del techo: 25 y 50 mm de *poliestireno extruido* con *conductividad térmica* $\lambda=0.1008 \text{ kJ}/(\text{h}\cdot\text{m}\cdot\text{K})$, *calor específico* $C_p = 1.47 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ y *densidad* $\rho = 30 \text{ kg}/\text{m}^3$.

Cada corrida de simulación analiza el comportamiento de la vivienda a lo largo de todo un año, y dado el gran número de simulaciones que fueron necesarias para este análisis, alrededor de 33,660 simulaciones (véase Tabla 11), se codificó un programa en el lenguaje C++ para automatizar las corridas del programa TRNSYS.

Tabla 11. Parámetros que fueron variados durante las simulaciones en TRNSYS.

Modelos de Edificaciones (3)	Zonas Térmicas (20 ciudades)	Modelos en TRNSYS (3)	Aislamiento Térmico (3)	Reflectancia Solar (9)*	Emisividad Infrarroja (9)*
Interes Social 1 planta de 48m ²	1 (4)	Cargas Térmicas	00 mm	0.1	0.1
	2 (4)			0.2	0.2
Edificio Residencial 2 plantas de 50m ²	3A (4)	Confort Térmico	25 mm	0.3	0.3
				0.4	0.4
Edificio No Residencial 3 plantas de 625m ²	3B y 3C (4)	Uso de Energía	50 mm	0.5	0.5
				0.6	0.6
	4 (4)			0.7	0.7
				0.8	0.8
				0.9	0.9

* Incrementos de 0.1 en los valores de RS y EI para los modelos de Cargas Térmicas y Confort Térmico. Incrementos de 0.2 en los valores de RS y EI para el modelo de Uso de Energía

En el programa para automatizar las corridas se inicia con una ventana donde se define la ruta de acceso para el archivo de datos climáticos, la ruta y el nombre del archivo de resultados, el archivo ejecutable de TRNSYS, el archivo que describe el modelo y el archivo

que describe el edificio (véase Figura 17a). Al cargar la información el programa prepara archivos que describen el modelo de TRNSYS (extensión tpf) y el edificio (extensión b17) para cada ciudad. En la segunda ventana se seleccionan las ciudades, así como se define el rango y el incremento para la variación de la RS y EI (ver Figura 17b). Una vez completado el esquema que se quiere simular el programa modifica el archivo que describe edificio (extensión b17) y realiza las simulaciones de manera automatizada en modo “batch”.

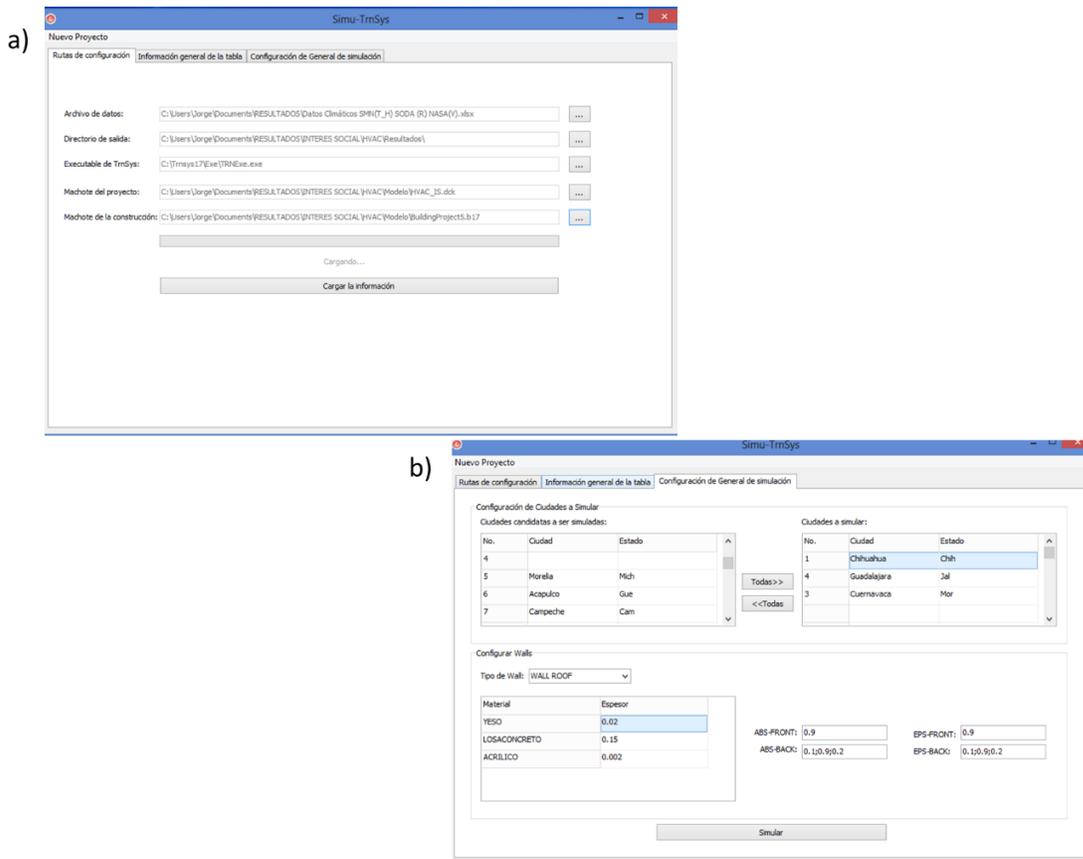


Figura 17. Ventanas del programa codificado en lenguaje C++ para automatizar corridas en TRNSYS. (a) Ventana para entrada de parámetros generales y (b) ventana para variar la RS, EI y nivel de aislamiento térmico del techo.

3. Resultados

3.1. Presentación de Resultados.

La Figuras 18 y 19 se muestra el tipo de gráfica utilizada para visualizar la variación en los parámetros utilizados para determinar el uso de energía (costo anual de la energía) y el confort térmico (porcentaje de horas al año con PPD>20%), como respuesta a los cambios en los valores de RS, EI y AT.

En la Figura 18 se compara el costo anual de energía contra la RS para cada valor EI (cada curva representa el mismo valor de EI y son referidas como isovalores de EI). Estas gráficas fueron construidas para cada uno de los edificios, en cada una de las veinte localidades y para cada nivel de aislamiento térmico. En el caso de la Figura 18 se muestra la variación del costo anual de la energía por efecto de la RS y EI para una Vivienda de Interés Social sin aislamiento térmico ubicada en la ciudad de México.

En esta gráfica se pueden observar lo siguiente:

- Se puede determinar la "*combinación óptima*" de RS y EI, que es aquella que corresponde al valor mínimo del parámetro a evaluar, en este caso el consumo anual de la energía para la ciudad de México.
- Un parámetro que puede utilizarse para comparar la magnitud del consumo de energía entre las diferentes ciudades es el "*promedio*" entre el valor máximo y el valor mínimo.
- Para evaluar el efecto de la RS y EI sobre el consumo anual de la energía, se utilizó la "*reducción*" en el consumo anual de energía desde el valor máximo hasta el valor mínimo.

El *promedio* del costo anual de energía para la Vivienda de Interés Social ubicada en la ciudad de México, es de \$2,542 y la mayor *reducción* de este costo es de \$1,453. El valor mínimo es de \$1,815 con la *combinación óptima* de RS=0.7 y EI=0.1, estos resultados son mostrados en la Figura 18.

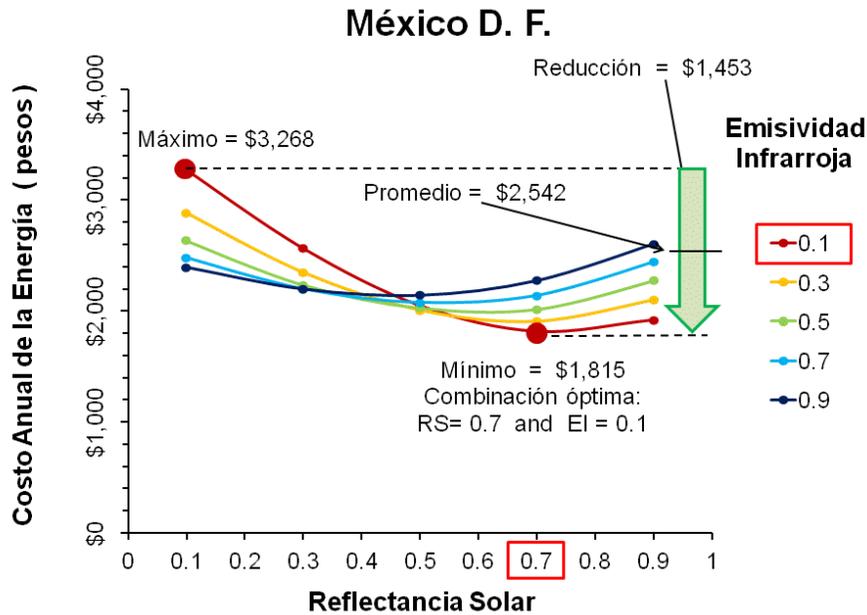


Figura 18. Ejemplo de gráfica con los resultados para la ciudad de México.

Por otra parte, para cuantificar el efecto del aislamiento térmico, se utilizaron las reducciones, tanto en el costo de la energía como en el porcentaje de horas con PPD>20%, para la peor y mejor combinación entre el caso base y cada uno de los dos niveles de aislamiento térmico definidos en este estudio: 25 y 50 mm de XPS. La Figura 19 muestra una comparación entre las gráficas para el caso base (techo sin aislamiento térmico) y la vivienda con 25 mm de aislamiento térmico en el techo, en ambas gráficas se indica el efecto combinado de la RS y EI para cada caso con flechas verdes, se puede observar como la reducción en el costo de la energía por efecto de las propiedades ópticas cambia de \$1,453 para el caso base a solo \$277 para el techo con 25 mm de aislamiento térmico. El efecto del aislamiento térmico cuando se tiene las peores combinaciones es mostrado mediante la flecha roja y es de \$1,644; mientras que este efecto es de \$467 cuando se tiene las mejores combinaciones de RS y EI.

El efecto tanto de las propiedades ópticas como del aislamiento térmico es estimado y presentado a partir de las reducciones mostradas en la Figura 19.

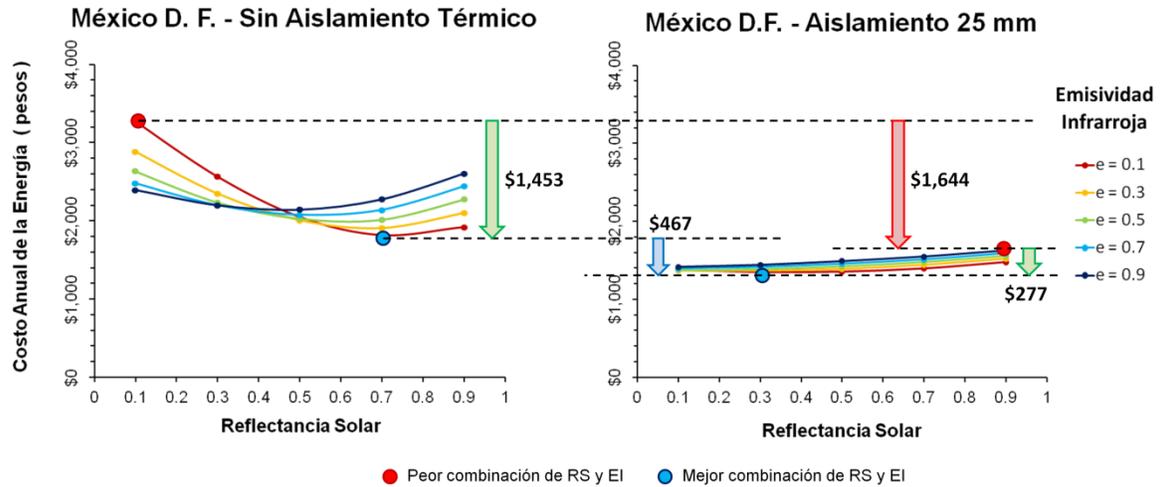


Figura 19. Gráfica mostrando las reducciones por efecto de las propiedades ópticas (flechas verdes) y por efecto del aislamiento térmico (roja y azul).

3.2. Cargas Térmicas.

La carga pico de diseño varía dependiendo de los valores de RS y EI, así como el nivel de aislamiento térmico (figura 2). La adición del aislamiento reduce en general la carga pico, y disminuye el efecto de la RS y EI, de tal forma una sola dimensión de equipo de climatización es requerida para todas las combinaciones de RS y EI, en la mayoría de los casos de edificaciones con aislamiento térmico en el techo.

Las capacidades nominales para cada uno de los edificios y para cada localidad están resumidas en las Tablas 12 y 13.

Las capacidades nominales de estos equipos para la Vivienda de Interés Social y el Edificio Residencial fueron considerados a partir de los 12,000 BTU/h (1 T.R.) hasta los 60,000 BTU/h (5 T.R.) con incrementos de 6,000 BTU/h (0.5 T.R.). Para el Edificio No Residencial son a partir de los 144,000 BTU/h (12 TR) y hasta los 540,000/h BTU (45 TR).

Tabla 12. Capacidades nominales de los sistemas de climatización artificial para la Vivienda de Interés Social (minisplit frío-calor), y para el Edificio Residencial (calefacción central y minisplit frío para cada planta).

	Ciudad	Vivienda de Interés Social	Edificio Residencial		
		Minisplit Frio-Calor BTU/h (T.R.)	Calefacción BTU/h	Minisplit Frio Planta 1 BTU/h (T.R.)	Minisplit Frio Planta 2 BTU/h (T.R.)
ZONA 1	Acapulco	36000 (3.0)	0	24000 (2)	60000 (5)
	Campeche	36000 (3.0)	0	24000 (2)	48000 (4)
	Culiacan	36000 (3.0)	50000	24000 (2)	48000 (4)
	Veracruz	36000 (3.0)	50000	24000 (2)	48000 (4)
ZONA 2	Cuernavaca	24000 (2.0)	50000	12000 (1)	48000 (4)
	Guadalajara	30000 (2.5)	75000	12000 (1)	48000 (4)
	Hermosillo	42000 (3.5)	75000	24000 (2)	60000 (5)
	Monterrey	36000 (3.0)	75000	24000 (2)	48000 (4)
ZONA 3A	México D.F.	24000 (2.5)	75000	12000 (1)	36000 (3)
	Morelia	30000 (2.5)	75000	12000 (1)	36000 (3)
	Puebla	24000 (2.5)	75000	12000 (1)	36000 (3)
	Queretaro	24000 (2.5)	75000	12000 (1)	36000 (3)
ZONA 3 (B y C)	Chihuahua	36000 (3.0)	100000	24000 (2)	48000 (4)
	Saltillo	30000 (2.5)	75000	12000 (1)	36000 (3)
	San Luis Potosí	30000 (2.5)	75000	12000 (1)	36000 (3)
	Orizaba	30000 (2.5)	75000	12000 (1)	36000 (3)
ZONA 4	Tlaxcala	24000 (2.5)	75000	12000 (1)	36000 (3)
	Toluca	30000 (2.5)	100000	12000 (1)	36000 (3)
	Pachuca	30000 (2.5)	75000	12000 (1)	36000 (3)
	Zacatecas	30000 (2.5)	75000	12000 (1)	36000 (3)

Tabla 13. Capacidades nominales de los sistemas de climatización artificial para el Edificio No Residencial, unidades en BTU/h.

	Ciudad	Planta 1		Planta 2		Planta 3	
		Calefacción	Refrigeración	Calefacción	Refrigeración	Calefacción	Refrigeración
ZONA 1	Acapulco	0	300,000	0	240,000	0	480,000
	Campeche	0	300,000	0	240,000	0	480,000
	Culiacán	150,000	360,000	200,000	240,000	300,000	480,000
	Veracruz	100,000	300,000	100,000	240,000	150,000	420,000
ZONA 2	Cuernavaca	150,000	240,000	150,000	180,000	250,000	420,000
	Guadalajara	200,000	240,000	150,000	240,000	300,000	420,000
	Hermosillo	250,000	360,000	150,000	300,000	300,000	540,000
	Monterrey	200,000	360,000	200,000	240,000	300,000	480,000
ZONA 3A	México	250,000	180,000	200,000	144,000	300,000	360,000
	Morelia	200,000	240,000	200,000	240,000	250,000	360,000
	Puebla	300,000	180,000	200,000	144,000	300,000	300,000
	Querétaro	250,000	240,000	200,000	180,000	300,000	360,000
ZONA 3 (B y C)	Chihuahua	350,000	300,000	250,000	240,000	400,000	480,000
	Saltillo	300,000	240,000	200,000	240,000	350,000	420,000
	San Luis Potosí	300,000	240,000	200,000	180,000	350,000	360,000
	Orizaba	250,000	240,000	200,000	180,000	300,000	360,000
ZONA 4	Tlaxcala	300,000	240,000	200,000	144,000	300,000	300,000
	Toluca	350,000	180,000	250,000	120,000	400,000	240,000
	Pachuca	300,000	180,000	200,000	144,000	350,000	300,000
	Zacatecas	300,000	240,000	200,000	180,000	350,000	300,000

3.3. Costo Anual de la Energía.

3.3.1. Promedio del Costo Anual de Energía.

La Figuras 20-22 compara la magnitud del costo anual de energía en los tres tipos de edificaciones y para las 20 ciudades consideradas en este análisis. Las ciudades con los mayores costos corresponden a las ubicadas en la zona térmica 1, además de Hermosillo, Monterrey (ambos de la zona térmica 2). En estas ciudades el requerimiento de energía para enfriamiento domina sobre la demanda de energía para calefacción como puede observarse en la Figura 23. Chihuahua (zona térmica 3B), presenta también un alto costo anual de la energía en los casos de Vivienda de Interés Social y edificio residencial, para esta ciudad el costo de la energía es derivado tanto de la necesidad de enfriamiento como de calefacción. Toluca presenta un costo de energía intermedio, compuesto principalmente del costo de calefacción, siendo el costo anual en esta ciudad mayor al de Chihuahua para el edificio No Residencial.

La ciudad de México, Morelia y Puebla corresponde a las localidades con los menores costos de energía, en estas ciudades se requiere energía tanto para calefacción como para enfriamiento. Cuernavaca y Guadalajara presentan también bajos consumos de energía y cuyos requerimientos para enfriamiento son mayores que para calefacción, y Tlaxcala representa una ciudad con un consumo de energía relativamente bajo y con requerimiento de energía para calefacción dominante.

Vivienda de Interés Social

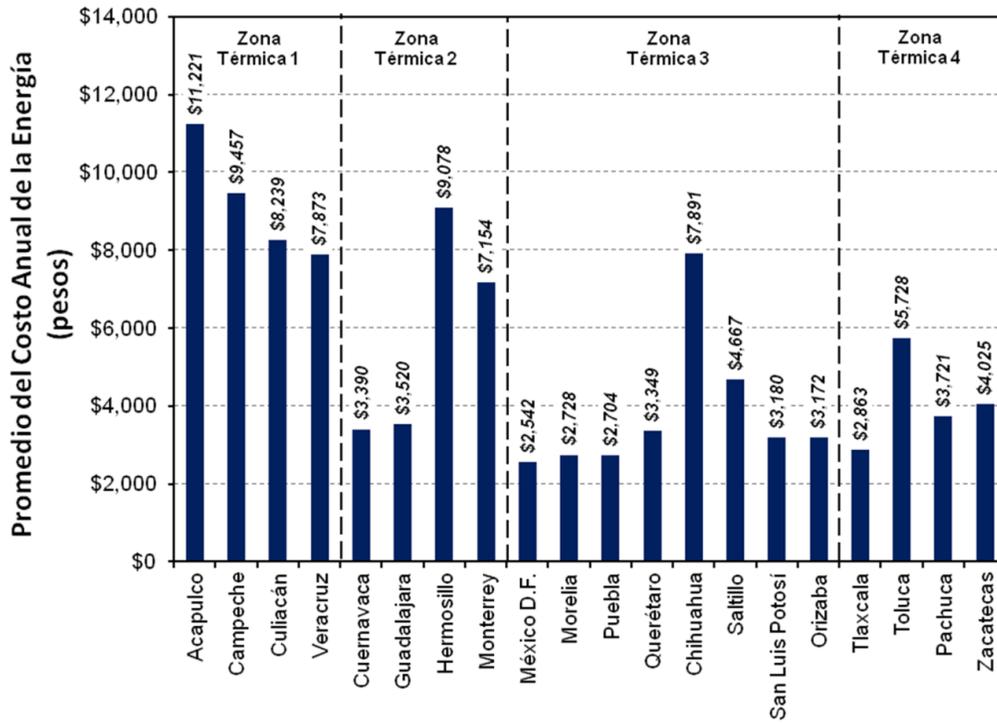


Figura 20. Promedio del CAE para la Vivienda de Interés Social.

Edificio Residencial

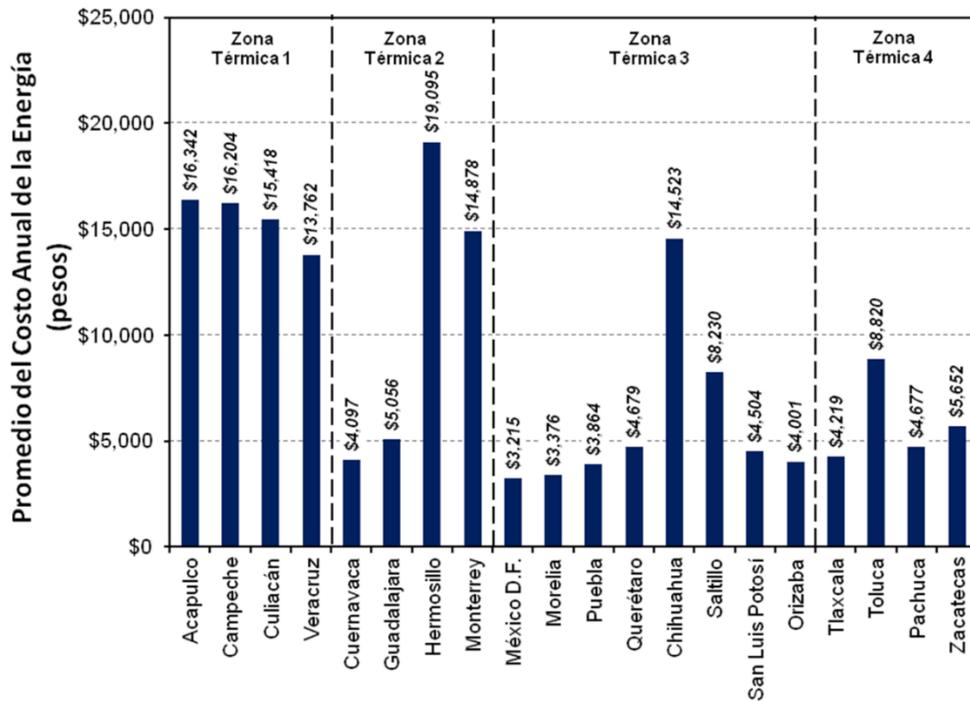


Figura 21. Promedio del CAE para el Edificio Residencial.

Edificio No Residencial

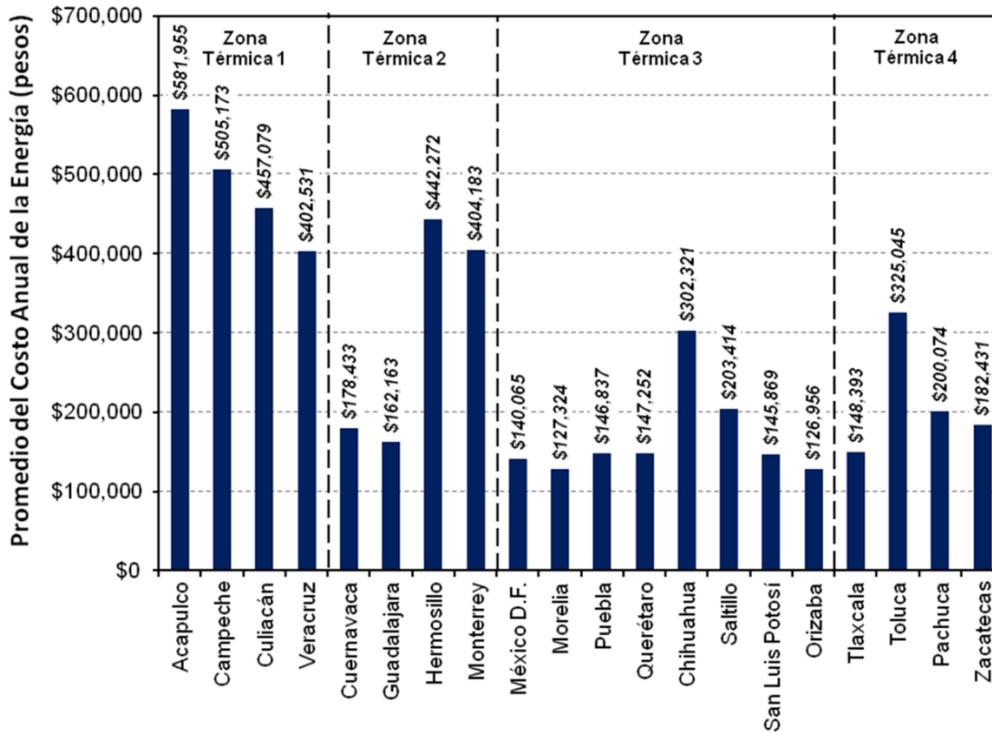


Figura 22. Promedio del CAE para el Edificio No Residencial.

Vivienda de Interés Social

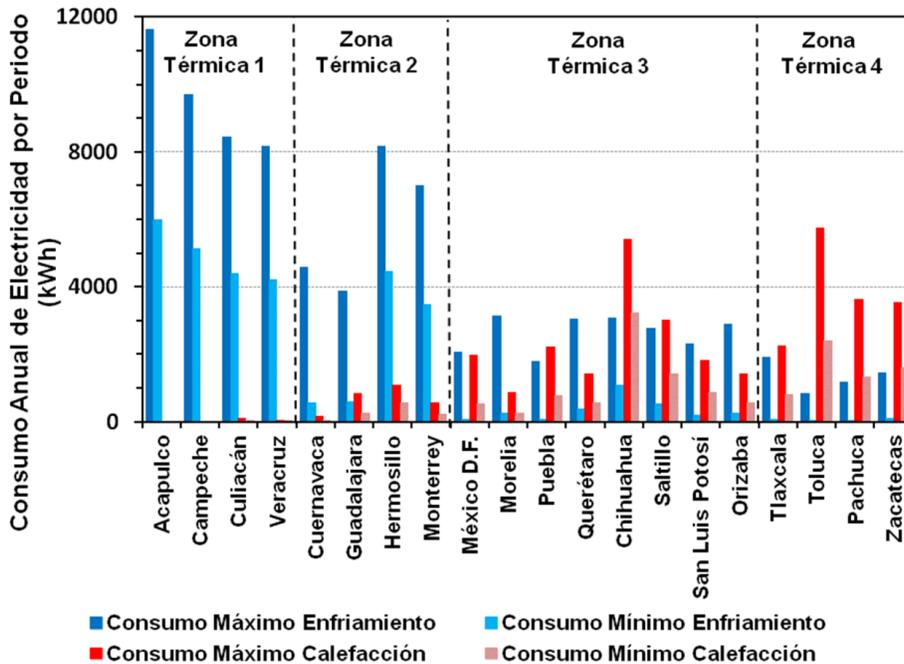


Figura 23. Consumos Máximos y Mínimos de Enfriamiento y Calefacción para la Vivienda de Interés Social.

3.3.2. Reducción del Costo Anual de Energía.

Las ciudades que presentan los mayores efectos de la RS y EI en la Vivienda de Interés Social y el edificio residencial corresponden a las ciudades de las zonas térmicas 1 y 2, con reducciones en el costo anual de energía mayores a los \$3,200, y donde se destacan las ciudades de Acapulco y Campeche con reducciones mayores a los \$5,200.

En la Vivienda de Interés Social y el Edificio Residencial, un segundo grupo con un efecto “intermedio” de la RS y EI corresponde a las ciudades de Toluca, Morelia, Querétaro y Orizaba con reducciones entre \$2,098 y \$3,763, el resto de las ciudades presentan reducciones menores a los \$2,000 (Figuras 24 y 25).

En el caso del Edificio No Residencial, la ciudad de Toluca resultó con el mayor efecto de las propiedades ópticas sobre el costo anual de la energía. El grupo de consumo energético intermedio corresponde a las ciudades Pachuca, Zacatecas y Tlaxcala de la zona 4, además de Puebla y ciudad de México con un rango en la reducción del costo anual entre \$42,414 y \$74,850. El resto de las ciudades de las zonas térmicas 1-3 presentan reducción del costo anual de la energía menores a \$31,239 (Figura 26).

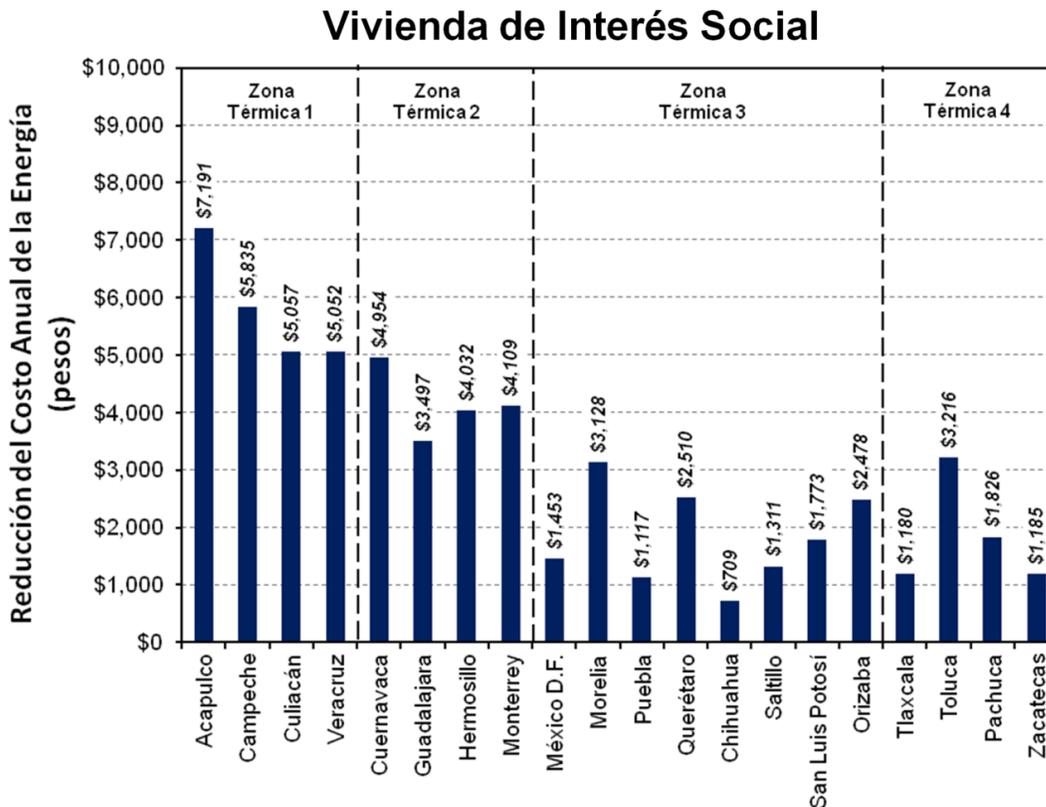


Figura 24. Reducción del CAE para la Vivienda de Interés Social.

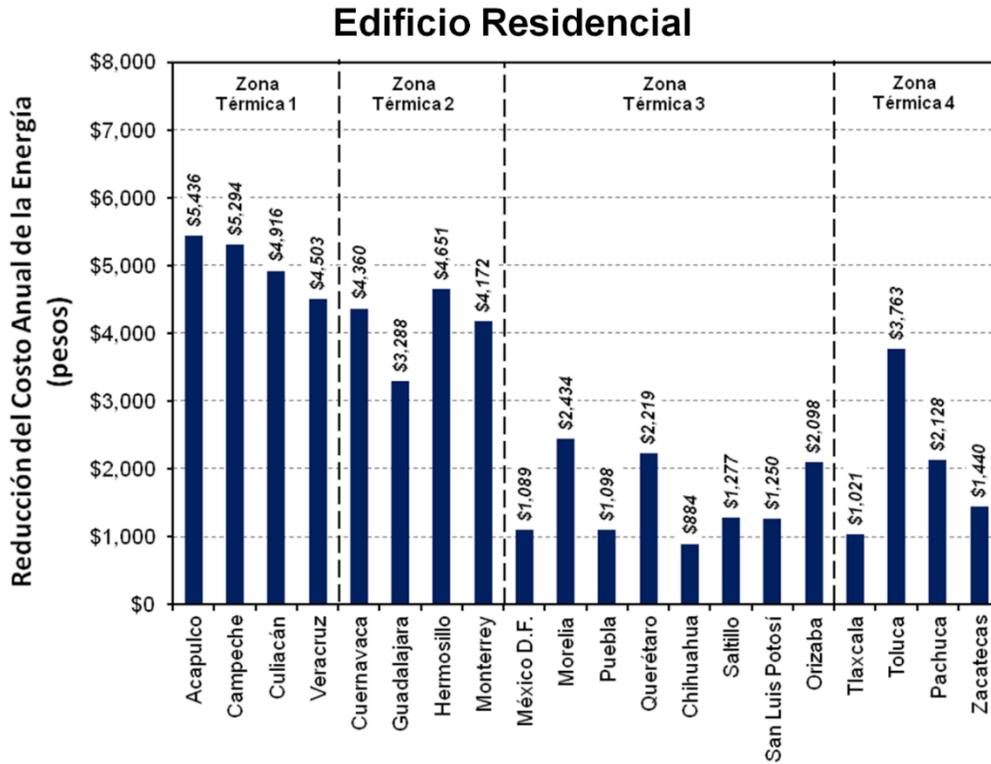


Figura 25. Reducción del CAE para el Edificio Residencial.

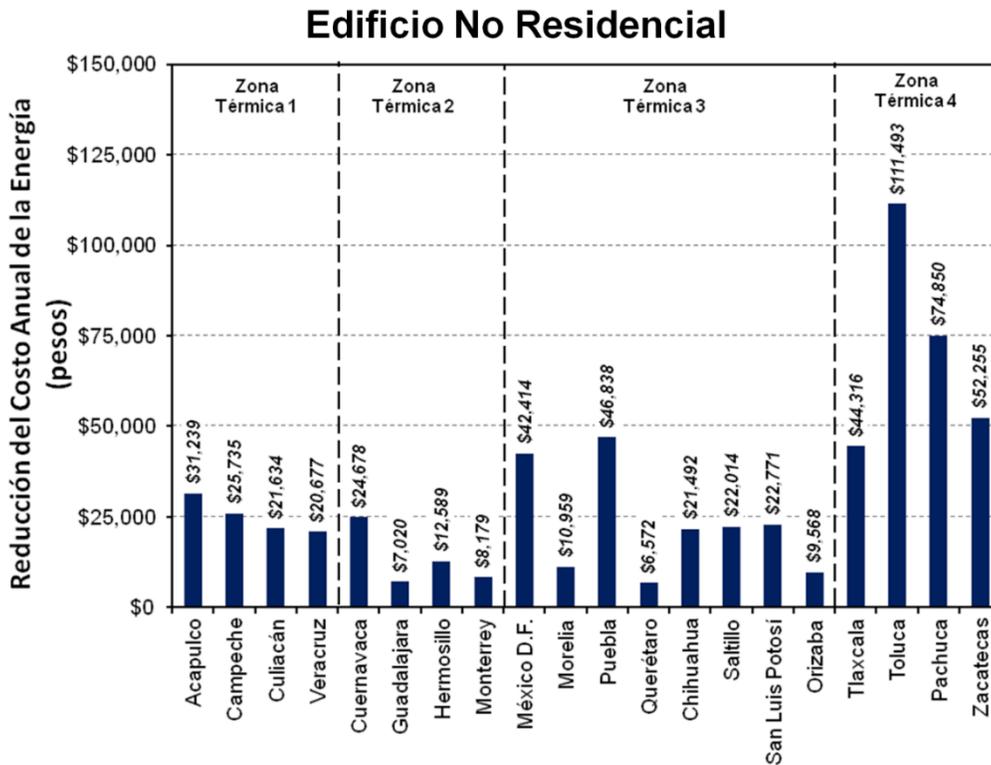


Figura 26. Reducción del CAE para el Edificio No Residencial.

3.3.3. Efecto del Aislamiento Térmico sobre el Costo Anual de la Energía.

De forma generalizada, el aislamiento térmico muestra que es efectivo para reducir el consumo de energía cuando se tiene propiedades ópticas inadecuadas, como puede observarse en las barras rojas de las gráficas en Figuras 27 a 29. Los mayores efectos sobre el costo anual de la energía, cuando se tiene las peores combinaciones de RS y EI se dan en las ciudades de la zonas térmicas 1 y 2 para la Vivienda de Interés Social y el edificio residencial, y en las ciudades de la zona térmica 4 para el edificio no residencial. Cuando se tiene la combinación óptima de RS y EI, el beneficio del aislamiento es reducido notablemente, compárese barras rojas contra barras azules en las Figuras 27 a 29, particularmente en las ciudades de las zonas térmicas 1 y 2. En algunos resultados de estas ciudades, la reducción del costo anual de la energía por efecto del aislamiento térmico resultó negativa, indicando un incremento en el costo si se aplica aislamiento térmico. La ciudad de Chihuahua resultó con las mayores reducciones por efecto del aislamiento térmico cuando se tiene una combinación óptima de las propiedades ópticas, siendo consistente en los tres tipos de edificaciones.

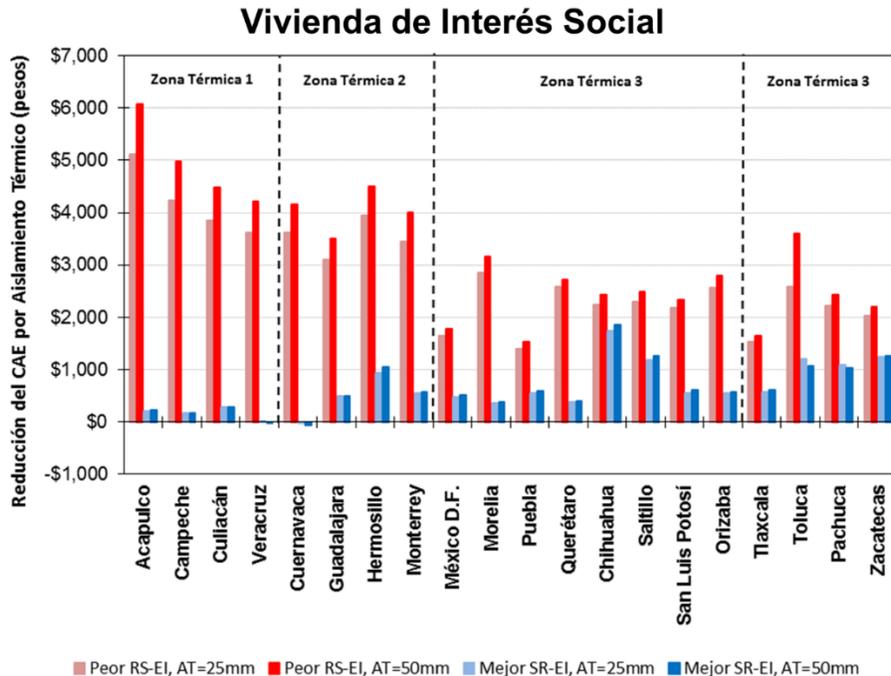


Figura 27. Reducción del costo de energía al utilizar aislamiento térmico en techo, considerando valores óptimos de RS y EI en la Vivienda de Interés Social.

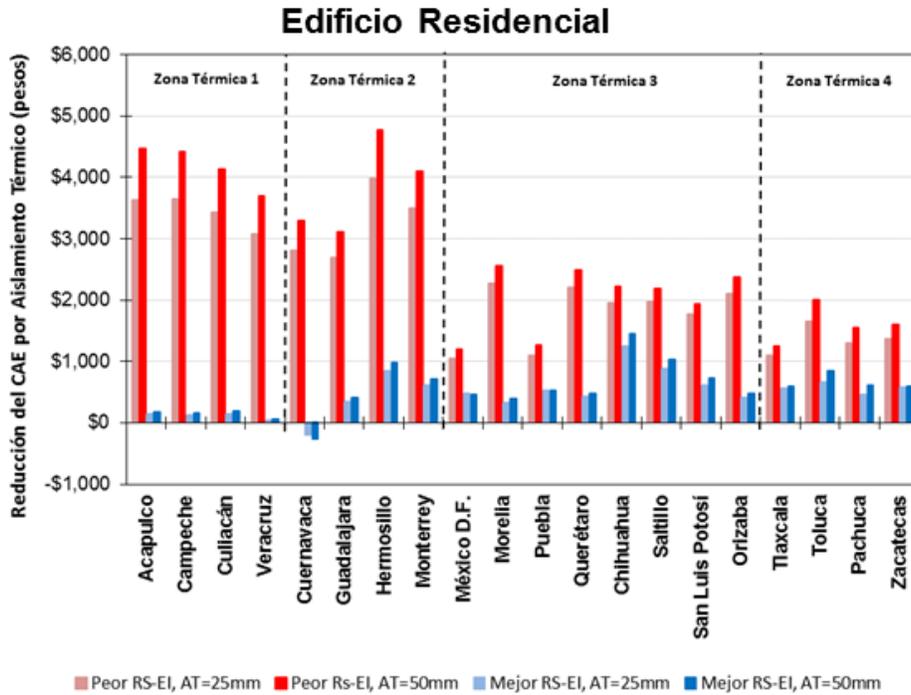


Figura 28. Reducción del costo de energía al utilizar aislamiento térmico en techo, considerando valores óptimos de RS y EI en Edificio Residencial.

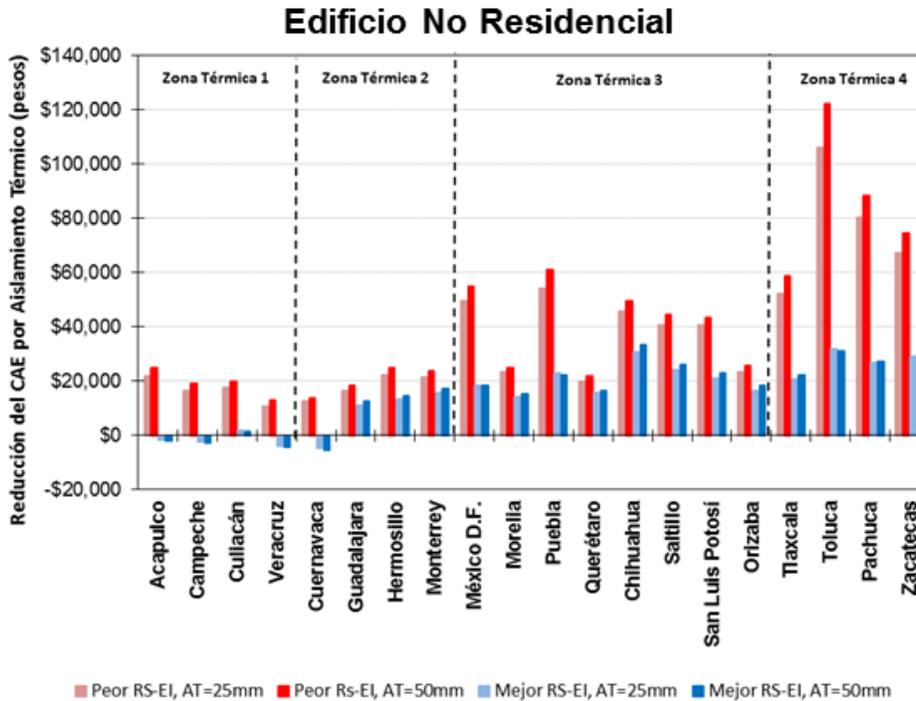


Figura 29. Reducción del costo de energía al utilizar aislamiento térmico en techo, considerando valores óptimos de RS y EI en Edificio No Residencial.

Solo se observan importantes incrementos en el ahorro o reducción del costo anual de la energía, por un incremento de 25mm a 50mm en el espesor del aislamiento térmico, cuando se tienen combinaciones inadecuadas de RS y EI. Particularmente en ciudades de las zonas térmicas 1 y 2 en la Vivienda de Interés Social y edificio residencial, y en la ciudad de Toluca para el caso del edificio no residencial.

Cuando se tiene valores óptimos de RS-EI, las mayores reducciones del CAE, comparando 25mm y 50mm de aislamiento térmico, se presentaron en la ciudad de Chihuahua y solo son \$126, \$206 y \$2,934 para la Vivienda de Interés Social, el edificio residencial y el edificio no residencial respectivamente. Estos ahorros en el costo de la energía son relativamente bajos si se comparan con los ahorro obtenidos entre el caso base y el aislamiento de 25mm, para esta misma ciudad, donde las reducciones son de \$1,731, \$1,251 y \$30,605 para la Vivienda de Interés Social, el edificio residencial y el edificio no residencial respectivamente.

3.3.4. Análisis Paramétrico y valores óptimos de RS y EI para el CAE.

Las Figuras 30 a 32 muestran casos representativos de los diferentes patrones de la variación del costo de la energía al cambiar los valores de la RS y EI del techo en los tres tipos de edificaciones.

Las ciudades cuyos requerimientos de energía para climatización artificial son dominados por las necesidades de enfriamiento (zonas térmicas 1 y 2), resultaron con las mayores diferencias del costo de la energía, en estas ciudades se requieren altos valores de RS, para disminuir la ganancia de calor por absorción de la radiación solar, y altos valores de EI, para incrementar la pérdida de calor por interacción de la radiación infrarroja con la atmosfera, como se puede observar en los casos de Acapulco, Campeche, Cuernavaca y Guadalajara de las Figuras 30 a 32. En las ciudades de estas dos zonas térmicas se tiene un relación lineal de la RS sobre el costo anual de la energía para cada isovalor de EI, observándose que el mayor efecto de la EI se da cuando $RS=0.1$ y decrece al aumentar la RS.

Conforme se incrementan las necesidades de calefacción en las ciudades de las zonas térmicas 3 y 4, se presenta una curvatura y un punto de convergencia en los isovalores de EI, resultando combinaciones óptimas que incluyen valores de $EI=0.1$ y de RS que varían entre 0.3 y 0.9. Como ejemplos se consideran los casos de las ciudades de Querétaro, México y Chihuahua (Figura 30) este punto de convergencia se presenta cuando RS es igual a 0.8, 0.5 y 0.1 respectivamente. La combinación óptima para estas tres ciudades incluye valores de EI igual a 0.1, y valores de RS igual a 0.9 para Querétaro, y 0.7 para México D. F. y Chihuahua.

Vivienda de Interés Social

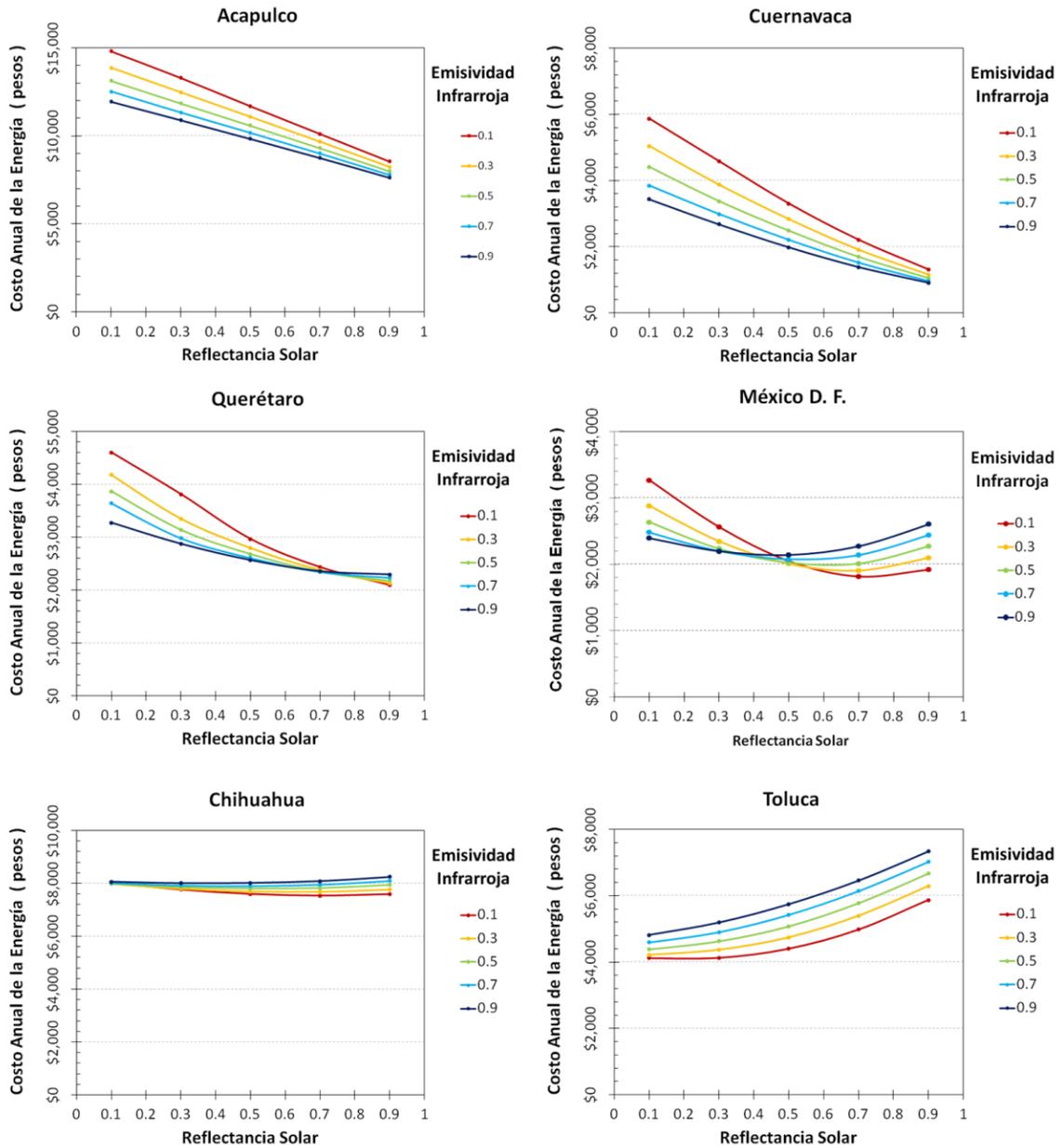


Figura 30. Patrones de la variación del costo de la energía en función de la RS y EI, para la Vivienda de Interés Social.

Edificio Residencial

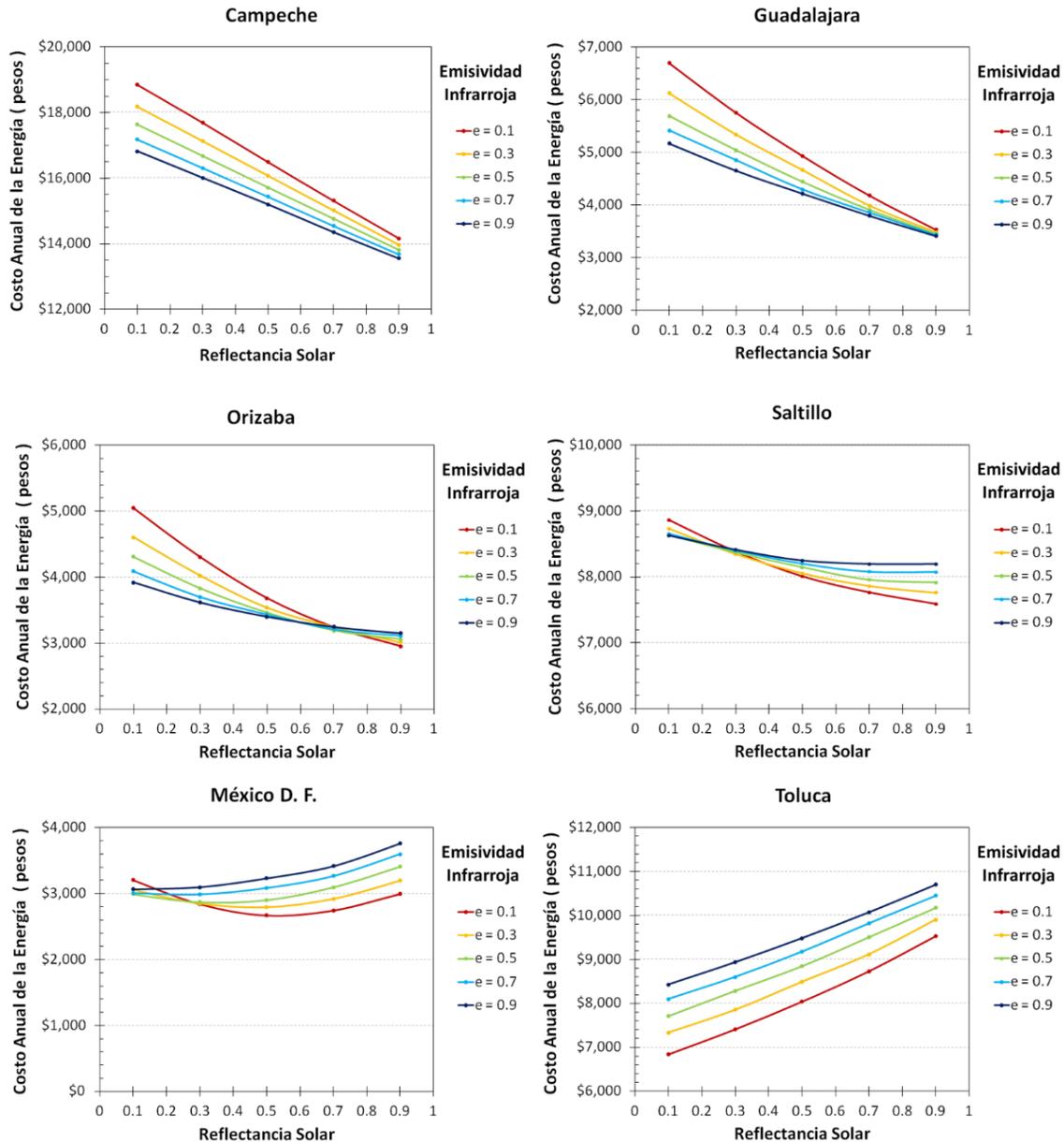


Figura 31. Patrones de la variación del costo de la energía en función de la RS y EI, para el Edificio Residencial.

El caso contrario a las ciudades de clima cálido, lo representa la ciudad de Toluca de zona térmica 4A, donde las necesidades energéticas para calefacción son significativamente mayor que las de enfriamiento, en este caso la combinación de RS=0.1 y EI=0.1 resultó como las más óptima (Figuras 30 y 31). Mostrando un patrón lineal con pendiente negativa en los isovalores de EI.

Edificio No Residencial

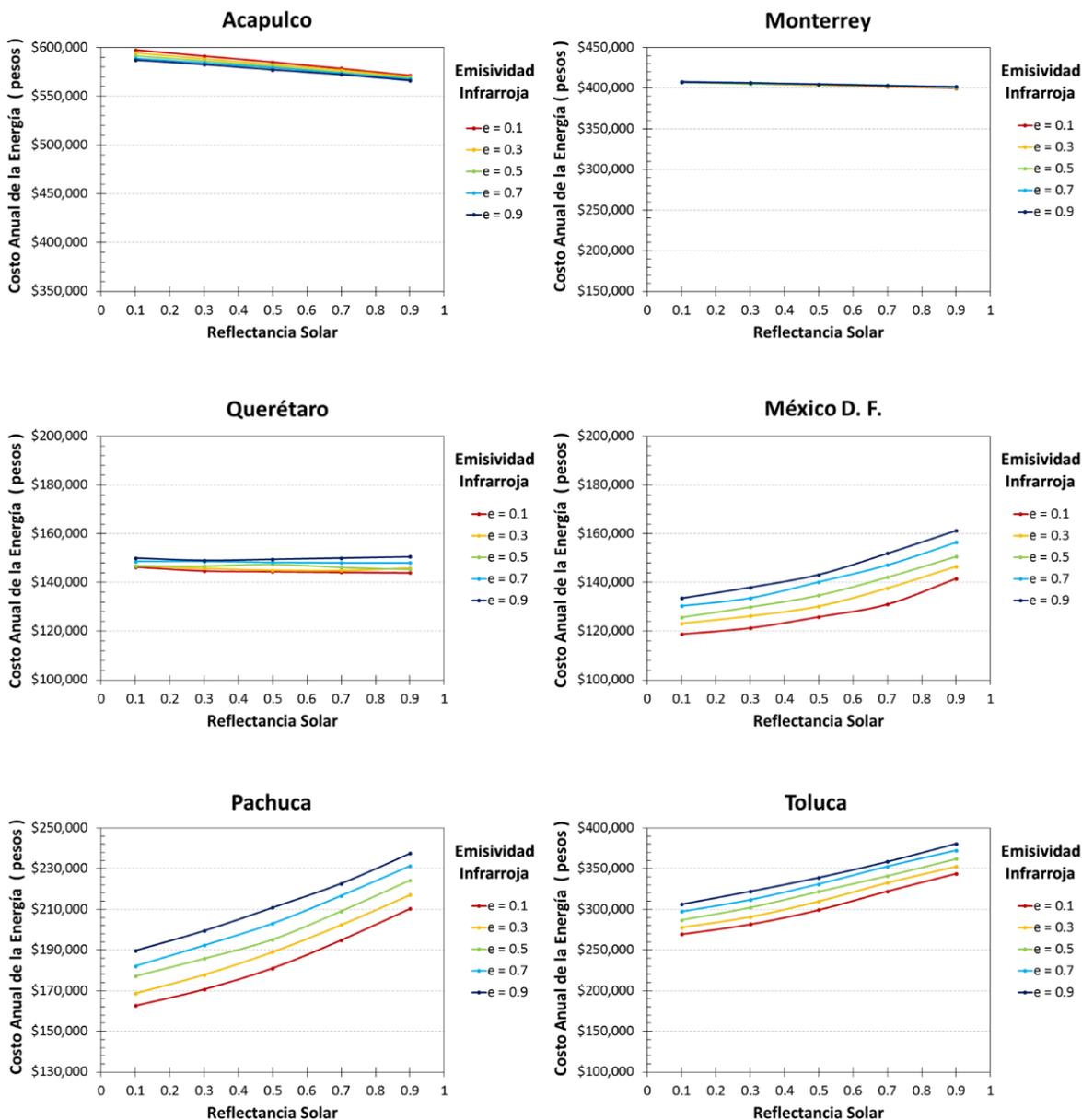


Figura 32. Patrones de la variación del costo de la energía en función de la RS y EI, para el Edificio No Residencial.

En los patrones que resultaron del Edificio No Residencial, no se presentó el punto de convergencia, pasando de un forma lineal de los isovalores de EI con valores óptimos de RS=0.9 y EI=0.9 (véase resultados de Acapulco en Figura 32), a una disposición casi horizontal de los isovalores de EI (mostrando un efecto mínimo de la RS como se puede observar en los resultados de Querétaro en la Figura 32). Las pendientes negativas de los

isovalores de EI para esta edificación resultan en todas las ciudades de la zona térmica 4, e incluso en algunas ciudades de la zona térmica 3, como lo muestran gráficas de la ciudad de México, Pachuca y Toluca en la Figura 32. En estas últimas tres ciudades la combinación óptima resultó ser de $RS=0.1$ y $EI=0.1$.

Gráficas para comparar los resultados de los diferentes espesores de aislamiento térmico también fueron analizadas, las Figuras 33 y 34 muestran los resultados de la Vivienda de Interés Social en las ciudades de Acapulco y Chihuahua.

En ambas puede observarse como disminuye la pendiente de los isovalores de EI al aplicar aislamiento térmico, indicando un menor efecto de la RS. También puede observar como las curvas de isovalores de EI se acercan con la adición de aislamiento térmico indicando una disminución en el efecto de la EI. Comparando los resultados de las combinaciones óptimas de RS y EI en ambas Figuras, puede observarse que el efecto del aislamiento térmico tiene una reducción significativa solo en la ciudad de Chihuahua, en comparación con la ciudad de Acapulco.

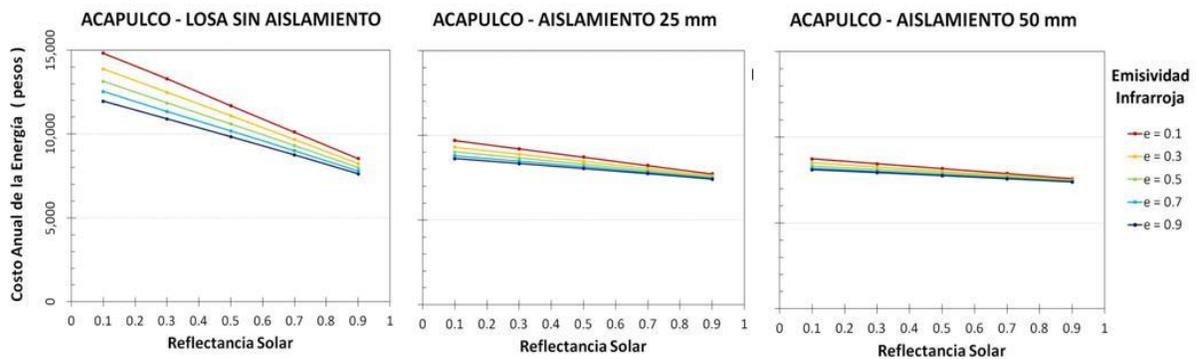


Figura 33. Variación del costo de la energía por efecto del aislamiento térmico para la Vivienda de Interés Social en la ciudad de Acapulco.

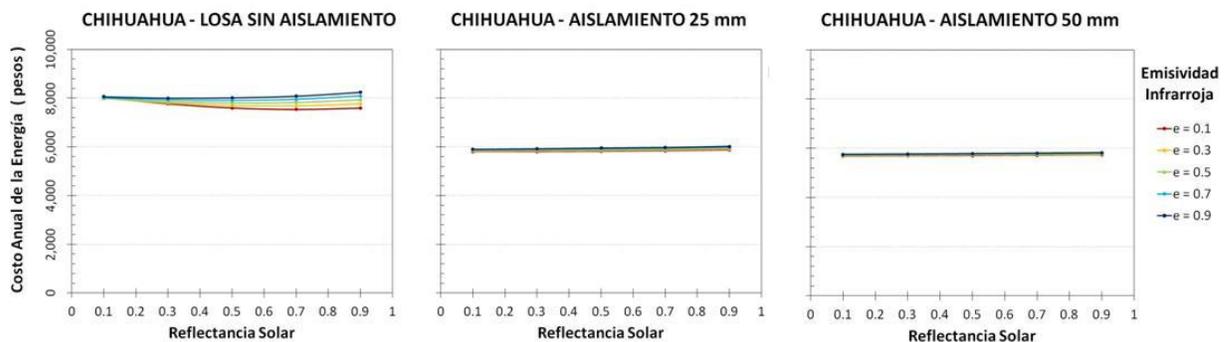


Figura 34. Variación del costo de la energía por efecto del aislamiento térmico para la Vivienda de Interés Social en la ciudad de Chihuahua.

Las combinaciones óptimas para las 20 ciudades son mostradas gráficamente en la Figuras 35 a 37. Los resultados de estas combinaciones para el caso base (sin aislamiento térmico en el techo) se muestran en primer plano, se puede observar valores de RS y EI óptimas igual a 0.9 para las ciudades de las zonas térmicas 1 y 2. Una excepción se presenta en la Vivienda de Interés Social en Guadalajara, donde resultó con un valor óptimo de EI=0.5, cabe mencionar que el punto de convergencia de los isovalores de EI en los resultados de Guadalajara se presenta cercas de la RS=0.9, la diferencia del CAE entre las combinaciones de EI=0.9 y EI=0.5, ambas con RS=0.9 para esta ciudad es de apenas \$11 pesos. De modo que se puede recomendar los más altos valores de RS y EI para la zona térmica 1 y 2, y para los tres tipos de edificaciones en una losa sin aislamiento térmico.

Para las tres edificaciones, la emisividad infrarroja que resultó óptima en el caso base en las zonas térmicas 3 y 4 es 0.1. Las RS óptima de 0.9 se presentan en algunas ciudades de la zona térmica 3: Morelia, Querétaro, Saltillo, San Luis Potosí y Orizaba, así como Chihuahua en el edificio residencial y el edificio no residencial. Es notable que conforme se disminuye la relación de la superficie del techo entre el volumen de la edificación, el valor de la reflectancia solar óptima se reduce en varias ciudades de las zonas térmicas 3 y 4, por ejemplo: para las ciudades de Morelia y Puebla la RS óptima es 0.7 para la Vivienda de Interés Social, 0.5 para el Edificio Residencial y 0.1 para el Edificio No Residencial. Una reducción similar en el valor de la EI óptima ocurre en el Edificio No Residencial para las ciudades de Guadalajara, Hermosillo y Monterrey.

Cuando se aplica aislamiento térmico la RS tiene a reducir su valor óptimo en algunas ciudades como es el caso de la Vivienda de Interés Social en México D. F. y Puebla, donde la RS óptima es 0.7 para el caso base, 0.3 cuando se tienen 25mm de AT y 0.1 para 50mm de AT. La EI óptima tiene a incrementarse de forma irregular en algunas ciudades como se puede observar en la Vivienda de Interés Social para las ciudades de Guadalajara, Morelia, Querétaro y Orizaba (Figura 35). Cabe mencionare que el efecto de la RS y EI decrece notablemente al aplicar aislamiento térmico como se mostró en la sección 3.3.2. Esto deriva en que sea menos trascendente seleccionar una combinación óptima si el techo cuenta con aislamiento térmico.

Vivienda de Interés Social – Costo Anual de la Energía

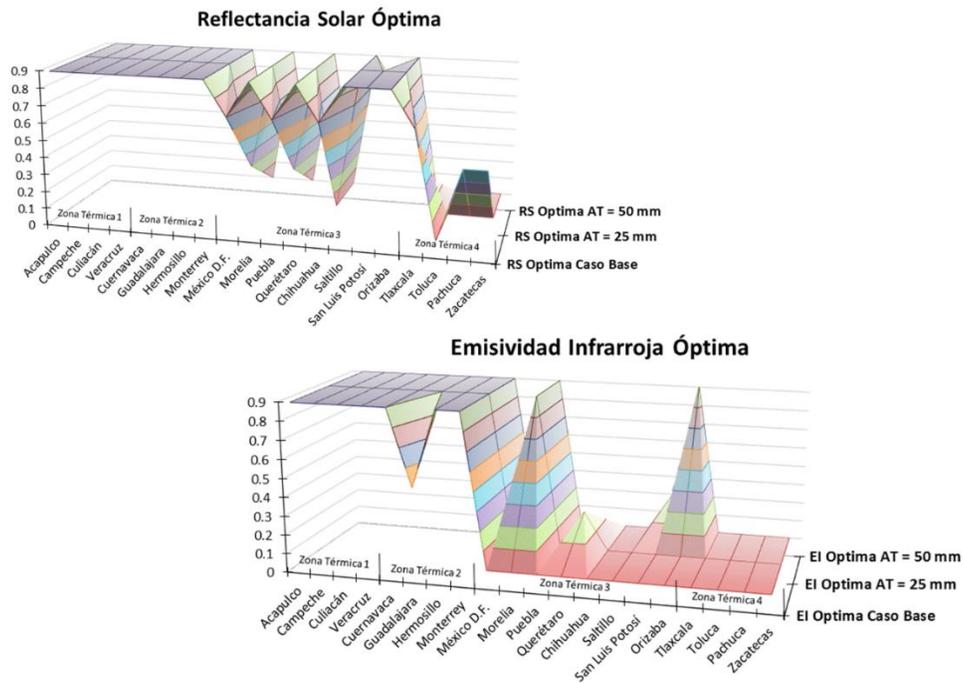


Figura 35. Combinaciones óptimas de RS y EI para el caso base y los dos niveles de aislamiento térmico en la Vivienda de Interés Social.

Edificio Residencial – Costo Anual de la Energía

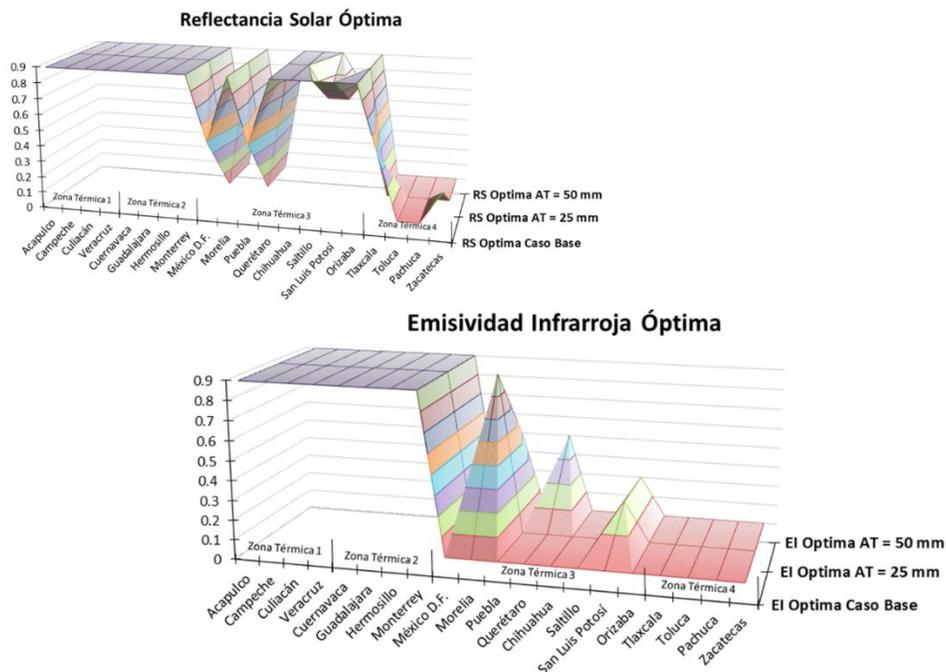


Figura 36. Combinaciones óptimas de RS y EI para el caso base y los dos niveles de aislamiento térmico en el Edificio Residencial.

Edificio No Residencial – Costo Anual de la Energía

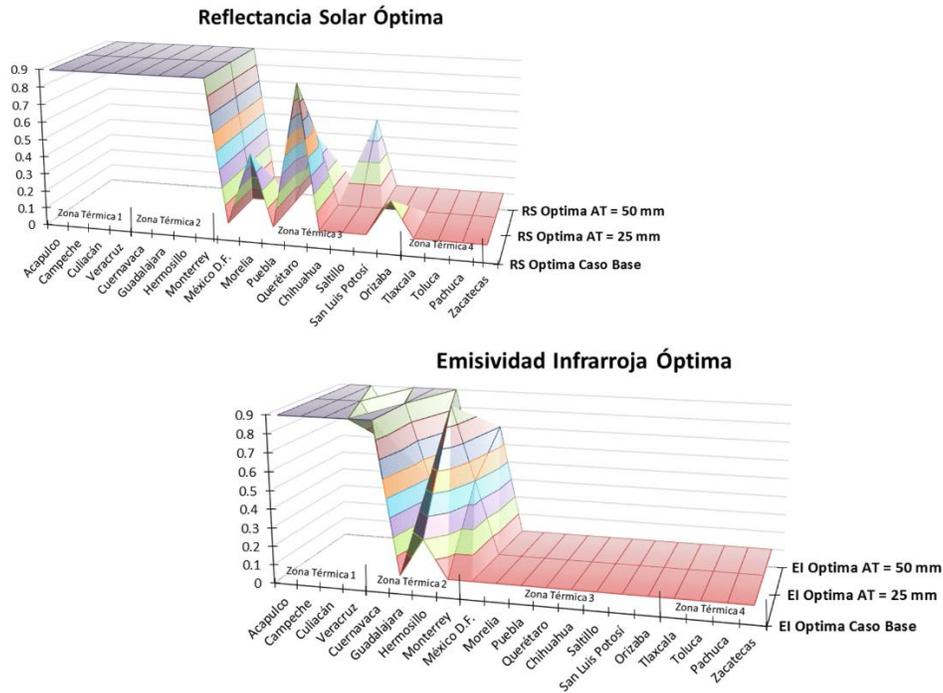


Figura 37. Combinaciones óptimas de RS y EI para el caso base y los dos niveles de aislamiento térmico en el Edificio No Residencial.

3.4. Confort Térmico.

3.4.1. Promedio del Porcentaje de Horas No Confortables

Las ciudades de la zona térmica 1, Hermosillo y Monterrey de las zona térmica 2, así como Chihuahua resultaron con los mayores promedios del Porcentaje de Horas No Confortables, con promedios del PHNC mayores al 60% para la Vivienda de Interés Social y mayores al 70% para los edificios Residencial y No Residencial (Figuras 38-40). Estas Horas No Confortables son en su mayoría por sensación de calor en las ciudades de la zona térmica 1, Hermosillo y Monterrey. En la ciudad de Chihuahua la Horas No Confortable son atribuibles tanto a horas con sensación de calor como a horas con sensación de frío.

El resto de las ciudades conforman un segundo grupo con promedios del PHNC menores al 50% en la Vivienda de Interés Social, menores al 70% en los edificios Residencial y No Residencial. En este grupo los mayores promedios corresponden a la ciudad de Toluca y Saltillo, mientras que menores promedios del PHNC corresponden a la ciudad de México, Morelia y Puebla.

Vivienda de Interés Social

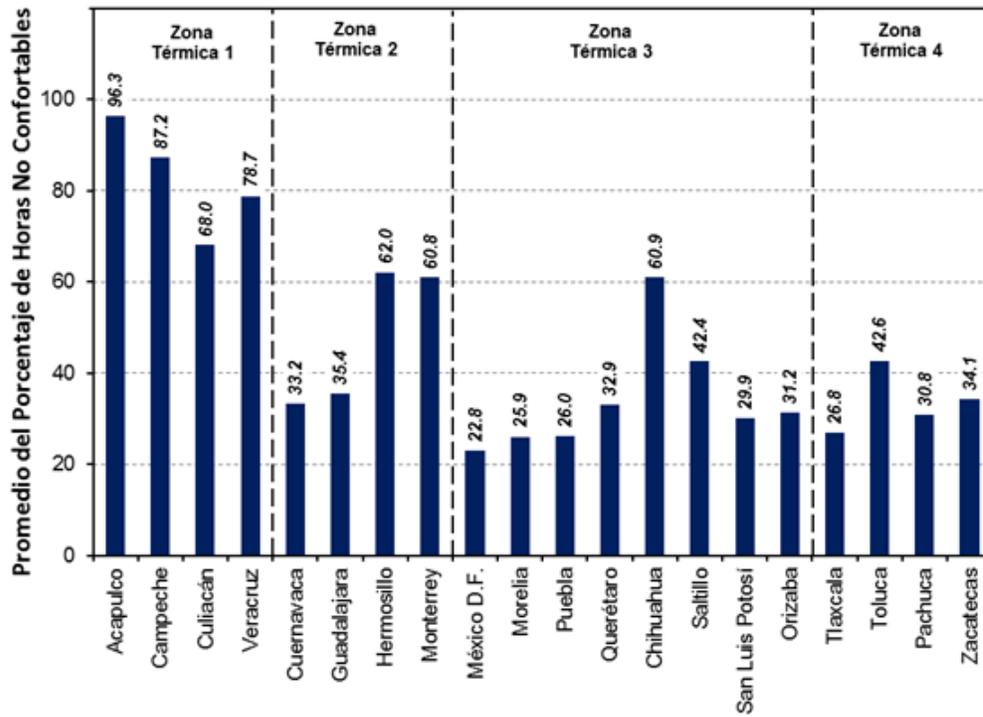


Figura 38. Promedio del PHNC para la Vivienda de Interés Social.

Edificio Residencial

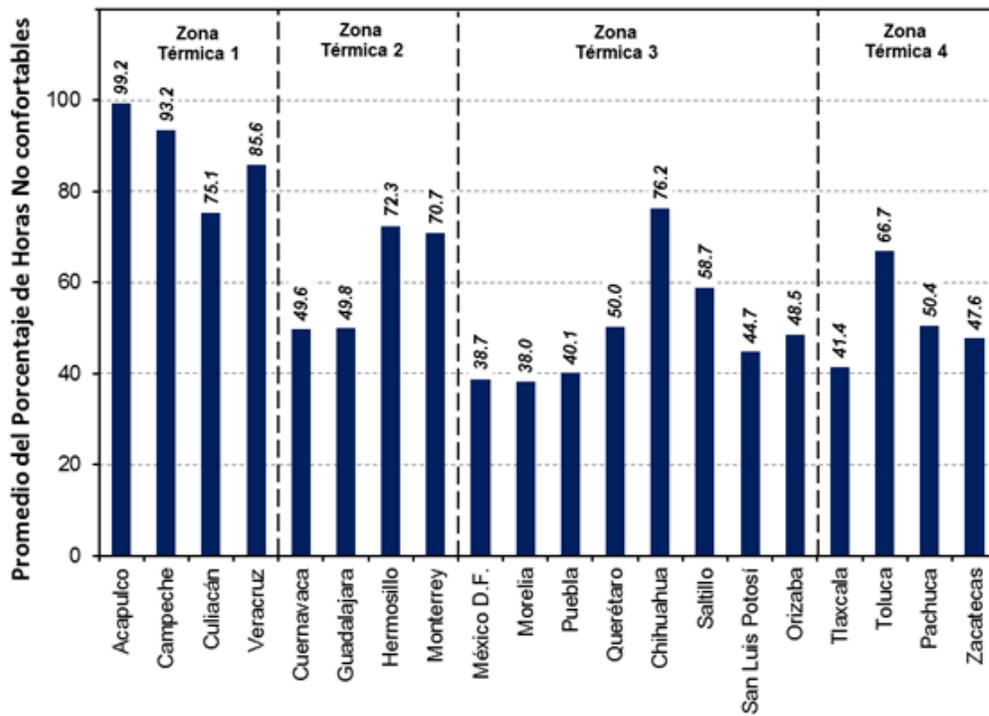


Figura 39. Promedio del PHNC para el Edificio Residencial.

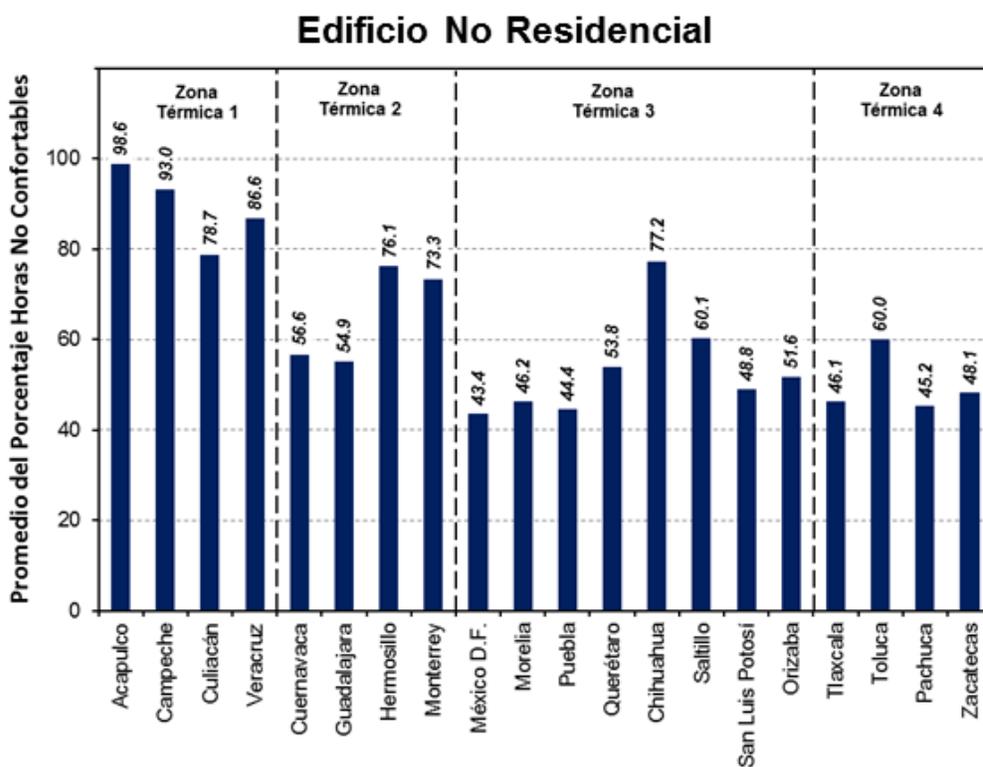


Figura 40. Promedio del PHNC para el Edificio No Residencial.

3.4.2. Reducción del Porcentaje de Horas No Confortables

La ciudad de Cuernavaca presenta una reducción excepcionalmente alta en el PHNC, la reducción del PHNC en esta ciudad fue la única mayor al 40% en la Vivienda de Interés Social y el Edificio Residencial, y la única mayor al 20% en el edificio No Residencial (Figuras 41 a 43).

Observando estos resultados de acuerdo a la zona térmica, podemos notar que se presenta, de forma relativa, un bajo efecto de la RS y EI en todas las ciudades la zona térmica 1; en Hermosillo y Monterrey de la zona térmica 2; en México D.F., Puebla, Chihuahua, Saltillo y San Luis Potosí de la zona térmica 3; y en Tlaxcala, Zacatecas y Pachuca de la zona térmica 4.

El resto de las ciudades incluye a: Guadalajara, Morelia, Querétaro, Orizaba y Toluca conforma un grupo con una reducción del PHNC en un nivel intermedio.

Si se compara el promedio con la reducción de PHNC, se puede observar que para las ciudades donde se presenta un gran número de horas no confortables (promedio de PHNC) existe un bajo efecto de la RS y EI sobre el confort térmico, con excepción de la ciudad de Toluca, donde se pueden tener importante reducciones de horas no confortables (por

sensación de frío) si se tiene adecuados valores de las propiedades ópticas en la superficie del techo.

Por otro lado ciudades como Cuernavaca, Guadalajara, Morelia y Querétaro, presentan promedios del PHNC relativamente bajos, ya que presentan condiciones climáticas durante todo el año que no son muy alejadas a las condiciones de confort térmico. En estas ciudades se presenta importantes reducciones por efecto de la RS y EI, a tal grado que los valores estas propiedades pueden ser determinante para definir si la edificación requiere o no un sistema de climatización artificial.

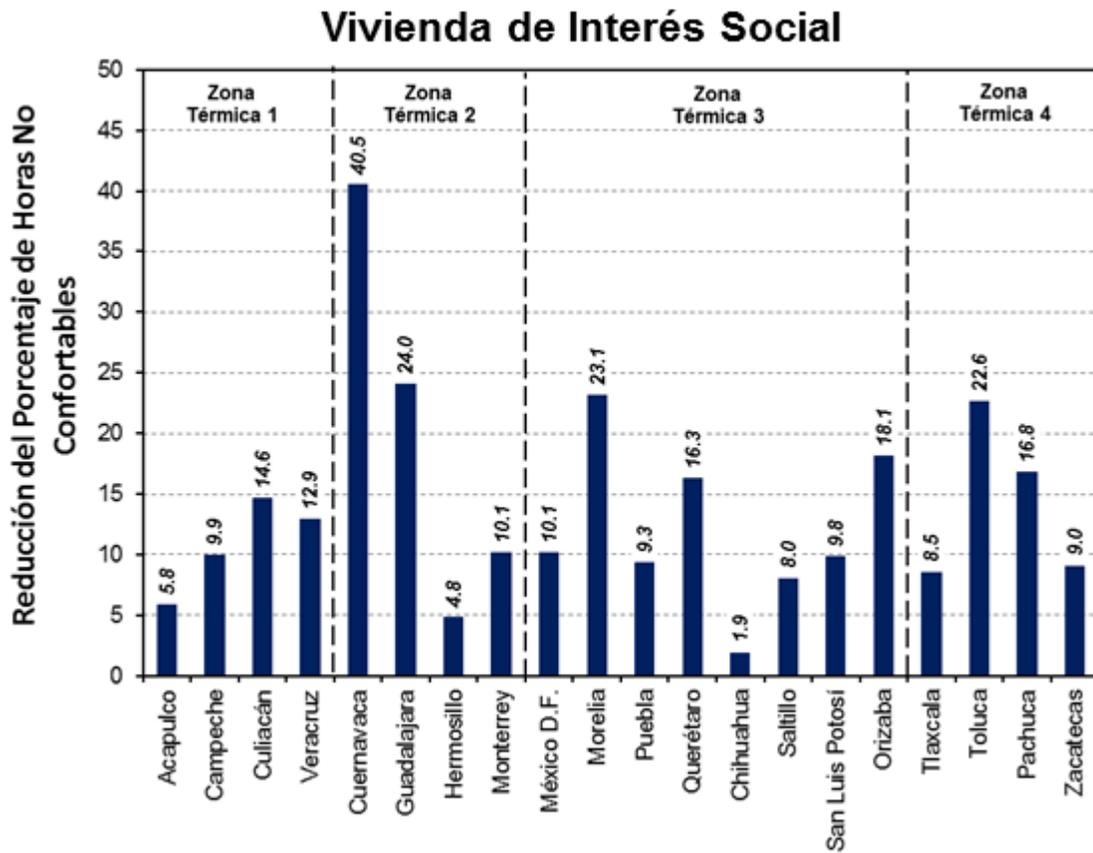


Figura 41. Reducción del PHNC para la Vivienda de Interés Social.

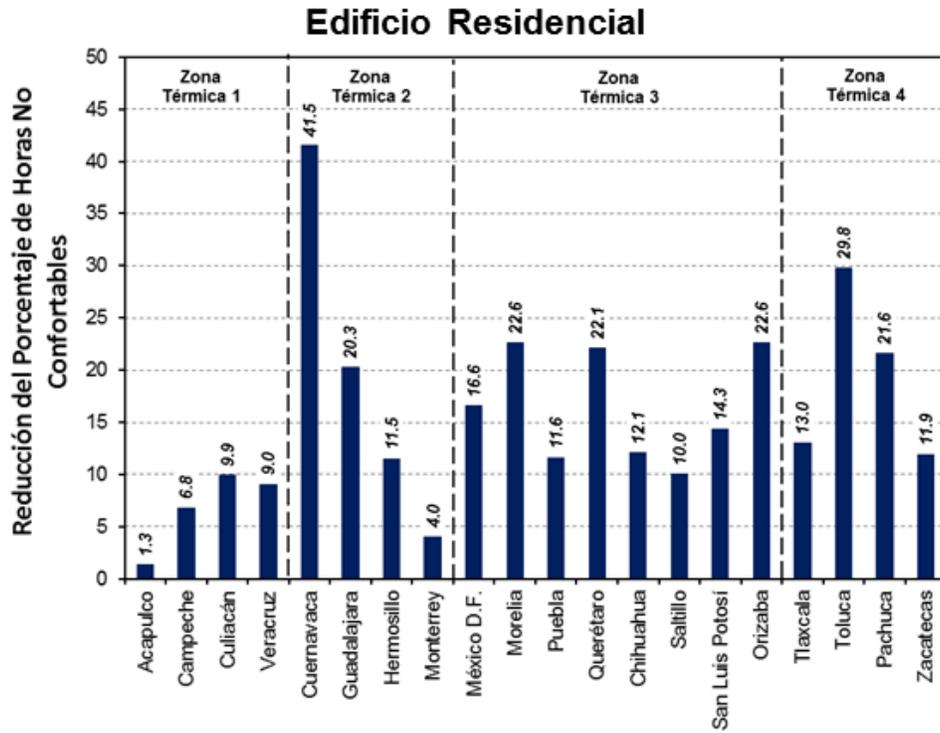


Figura 42. Reducción del PHNC para el Edificio Residencial.

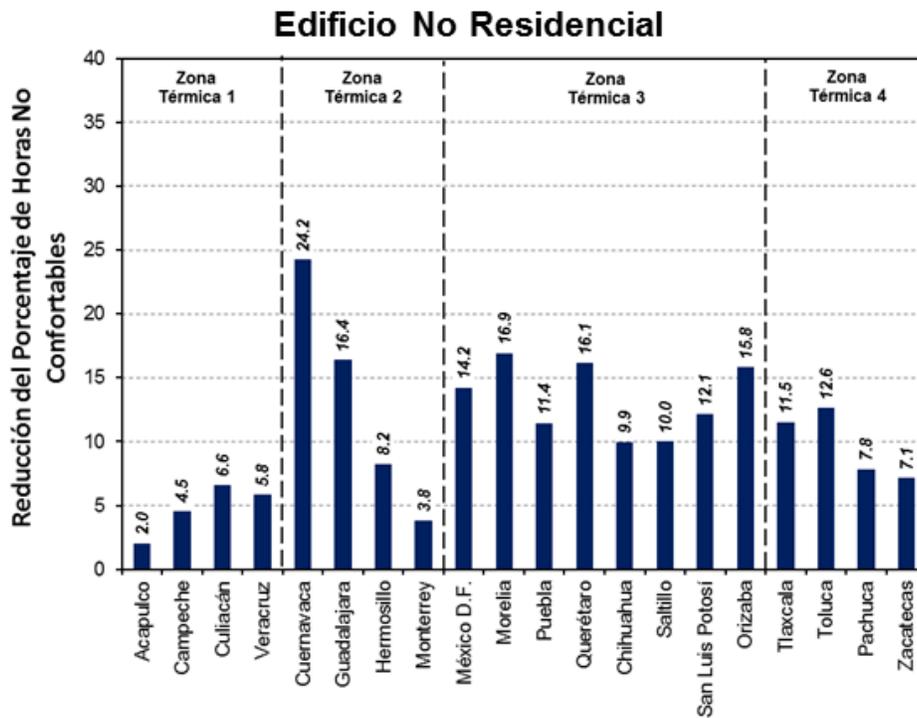


Figura 43. Reducción del PHNC para el Edificio No Residencial.

3.3.3. Efecto del Aislamiento Térmico sobre el Costo Anual de la Energía.

Al igual que el efecto que tiene la aplicación del aislamiento térmico en el techo sobre el Consumo Anual de Energía, la efectividad del AT depende en gran parte de que tan adecuados son los valores de la RS y la EI.

En las Figura 44 y 45 puede observarse que se tienen importantes reducciones, mayores al 15%, en ciudades como Cuernavaca, Morelia, Querétaro, Orizaba y Toluca cuando se tiene propiedades inadecuadas de RS y EI. Para el Edificio No Residencial las mayores reducciones del PHNC por efecto de AT se tiene en algunas ciudades de la zona térmica 3 y en las ciudades de la zona térmica 4 (Figura 46), pero de igual forma, solo cuando se tienen valores no apropiados de las propiedades ópticas.

Si se tienen una combinación óptima de RS y EI, la disminución de las horas no confortables en las edificaciones por la aplicación de AT en techo es muy limitada. En este escenario el PHNC se reduce en menos del 5% para todos los casos. El incrementar el AT de 25mm a 50mm tampoco implica un efecto importante se tienen la mejor combinación RS-EI, la mayor reducción por el incremento en el espesor de AT es de apenas el 0.3%.

Los valores negativos en los resultados mostrados en las Figuras 44 a 46, los cuales se presentan en algunas ciudades para la mejor combinación de RS y EI, indican las horas no confortables al año, y por tanto el PHNC, se incrementan por la aplicación de aislamiento térmico, resultando una medida contraproducente para la mejor térmica de la edificación.

El aislamiento térmico puede ser una opción viable para edificaciones con techos con altas pendientes ubicados en ciudades con altas reducciones del PHNC por AT como es el caso de Cuernavaca, ya que un techo blanco y altamente reflectivo puede presentar un problema de deslumbramiento o bien reflejar energía térmica-radiante que tenga efecto térmicos en otras edificaciones.

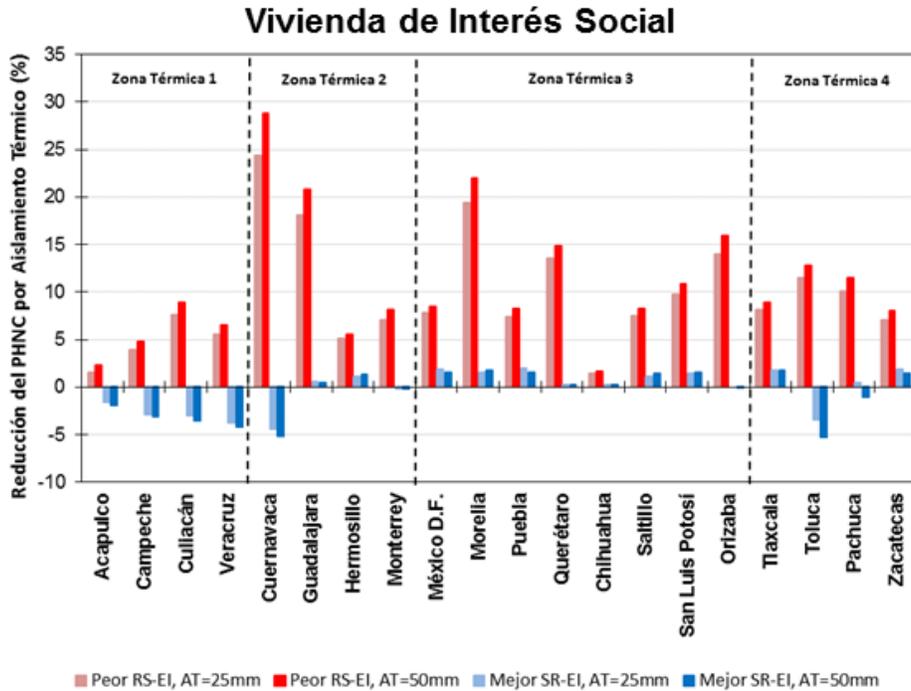


Figura 44. Reducción del Porcentaje de Horas No Confortables al utilizar aislamiento térmico en techo, considerando valores óptimos de RS y EI en la Vivienda de Interés Social.

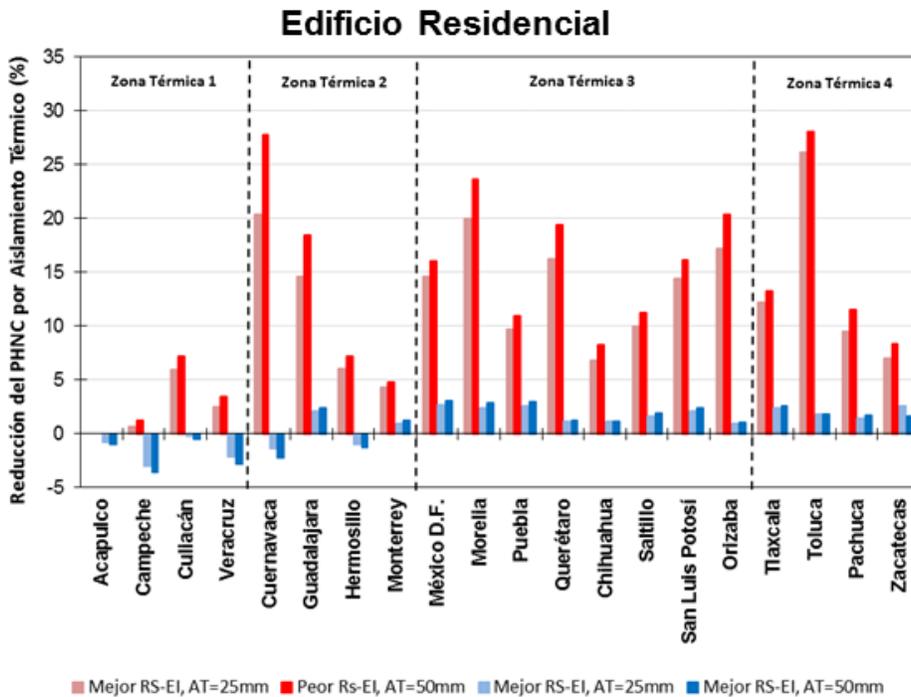


Figura 45. Reducción del Porcentaje de Horas No Confortables al utilizar aislamiento térmico en techo, considerando valores óptimos de RS y EI en el Edificio Residencial.

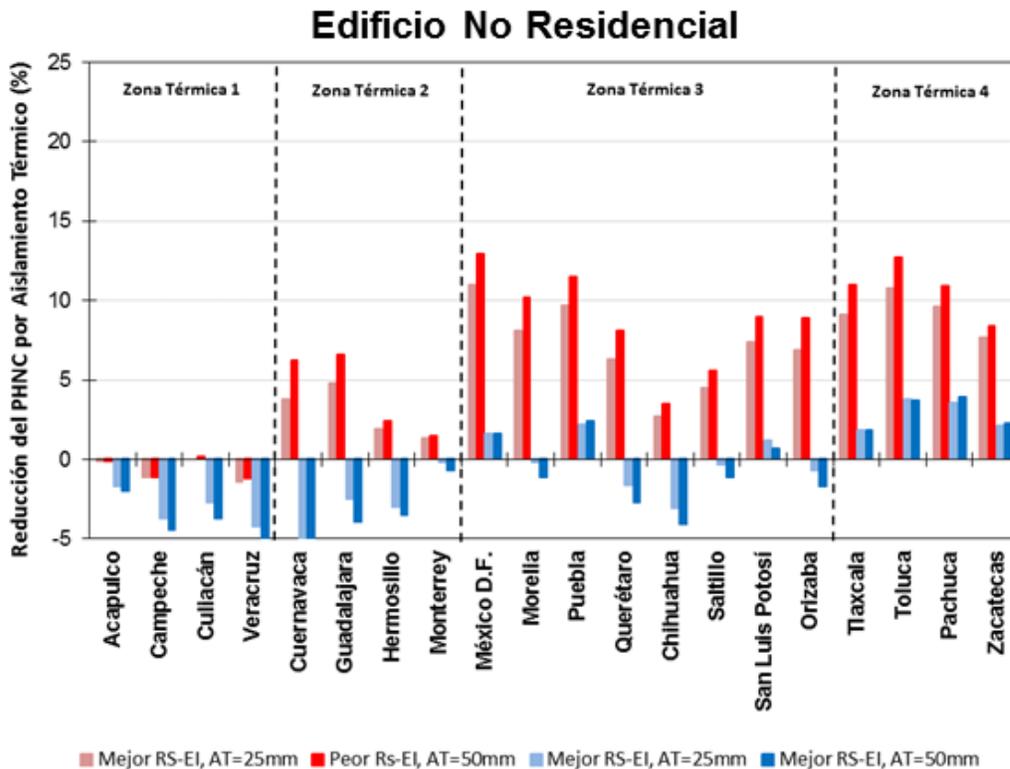


Figura 46. Reducción del Porcentaje de Horas No Confortables al utilizar aislamiento térmico en techo, considerando valores óptimos de RS y EI en el Edificio No Residencial.

3.3.4. Análisis Paramétrico y valores óptimos de RS y EI para el PHNC.

Las gráficas de la Figuras 47 a 49 muestran casos representativos de los diferentes patrones de la variación del Porcentaje de Horas No Confortables al cambiar los valores de la RS y EI del techo en los tres tipos de edificaciones.

La tendencia general es presentar los isovalores de EI casi horizontales, indicando bajo efecto de la RS, y muy cercanos unos de otros, por un bajo efecto de la EI, en las ciudades de las zonas térmicas 1. En estas ciudades se presenta un temperatura ambiente extremadamente alta, la reducción de la temperatura en el aire interior de la edificación y en la superficie interna del techo por tener altos valores de RS y EI no es suficiente para alcanza un rango de temperatura confortable en el interior de la vivienda. Sin embargo, esta reducción permite una reducción importante de horas al año en los parámetros que evalúan condiciones extremadamente no confortables, como es el caso del porcentaje de horas al año con el PPD > 50% y el PPD > 80%, como se muestra en la Figura 50 para la Vivienda de Interés Social ubicada en la ciudad de Acapulco.

En las ciudades con alta reducciones como es el caso de la ciudad de Cuernavaca, los isovalores de EI muestran una mayor pendiente, y una mayor separación entre isovalores, en este caso los isovalores de EI presentan una forma lineal con pendiente negativa, al incrementar la RS se reduce el PHNC.

Vivienda de Interés Social

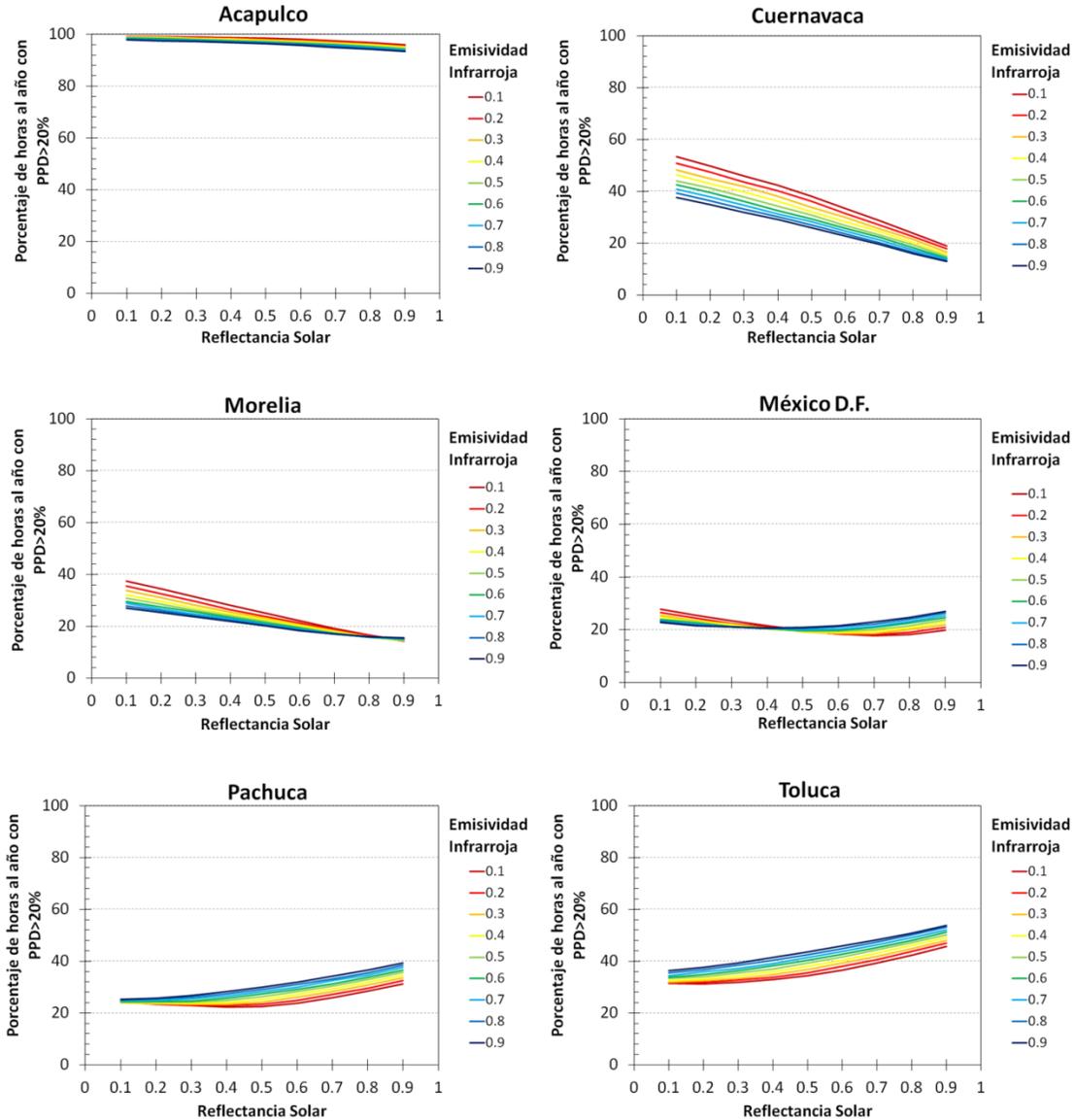


Figura 47. Patrones de la variación del Porcentaje de Horas No Confortables en función de la RS y EI, para la Vivienda de Interés Social.

Edificio Residencial

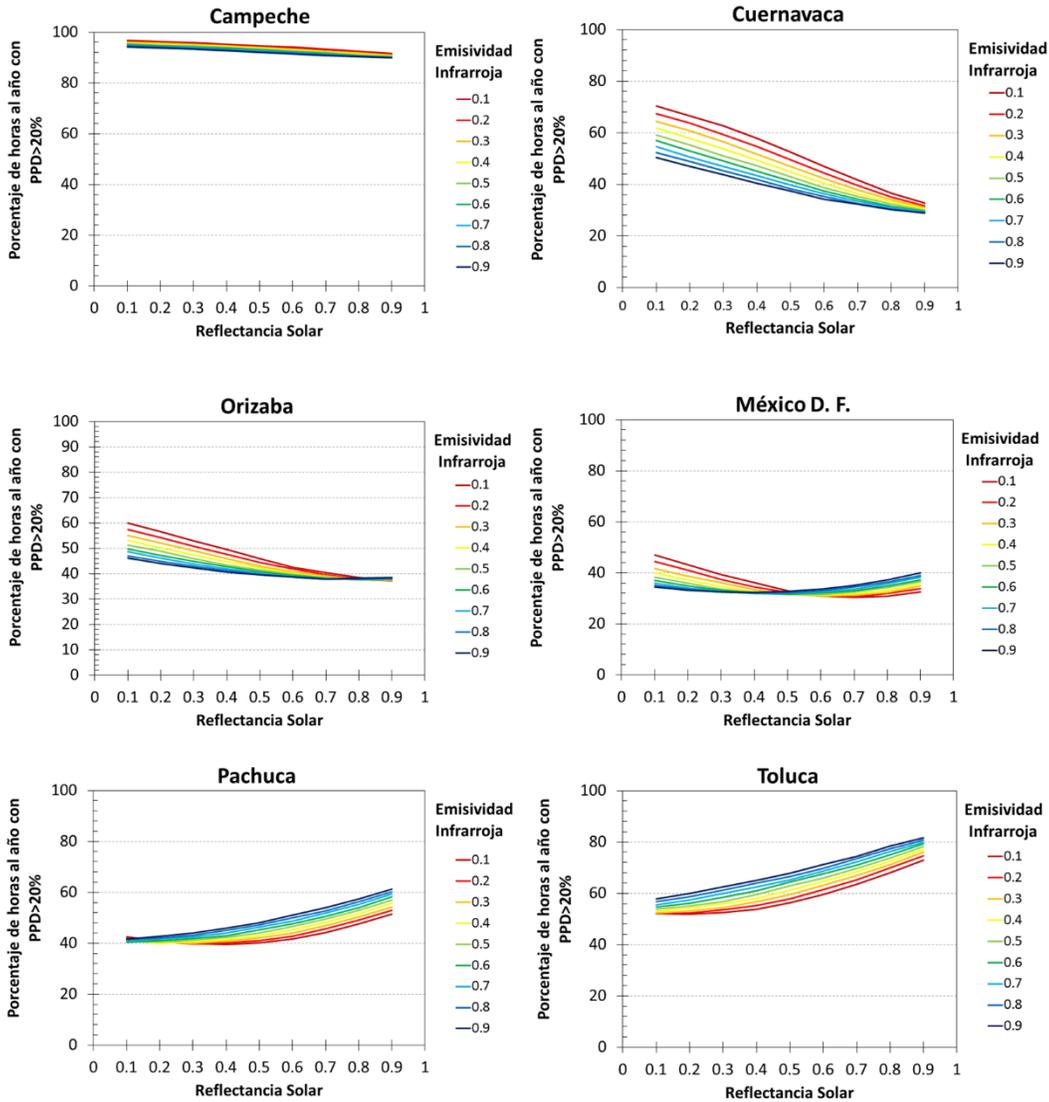


Figura 48. Patrones de la variación del Porcentaje de Horas No Confortables en función de la RS y EI, para el Edificio Residencial.

El punto de convergencia de los isovalores de EI se empieza a presentar en ciudades de la zona térmica 3, en esta zona este punto de convergencia se presenta entre valores de RS de 0.5 y 0.9. Para la zona térmica 4 el punto de convergencia se presenta en valores de RS menores de 0.5. La ciudad de Toluca vuelve a mostrar una relación lineal en los isovalores de EI con una pendiente positiva, a mayor RS mayor PHNC.

Edificio No Residencial

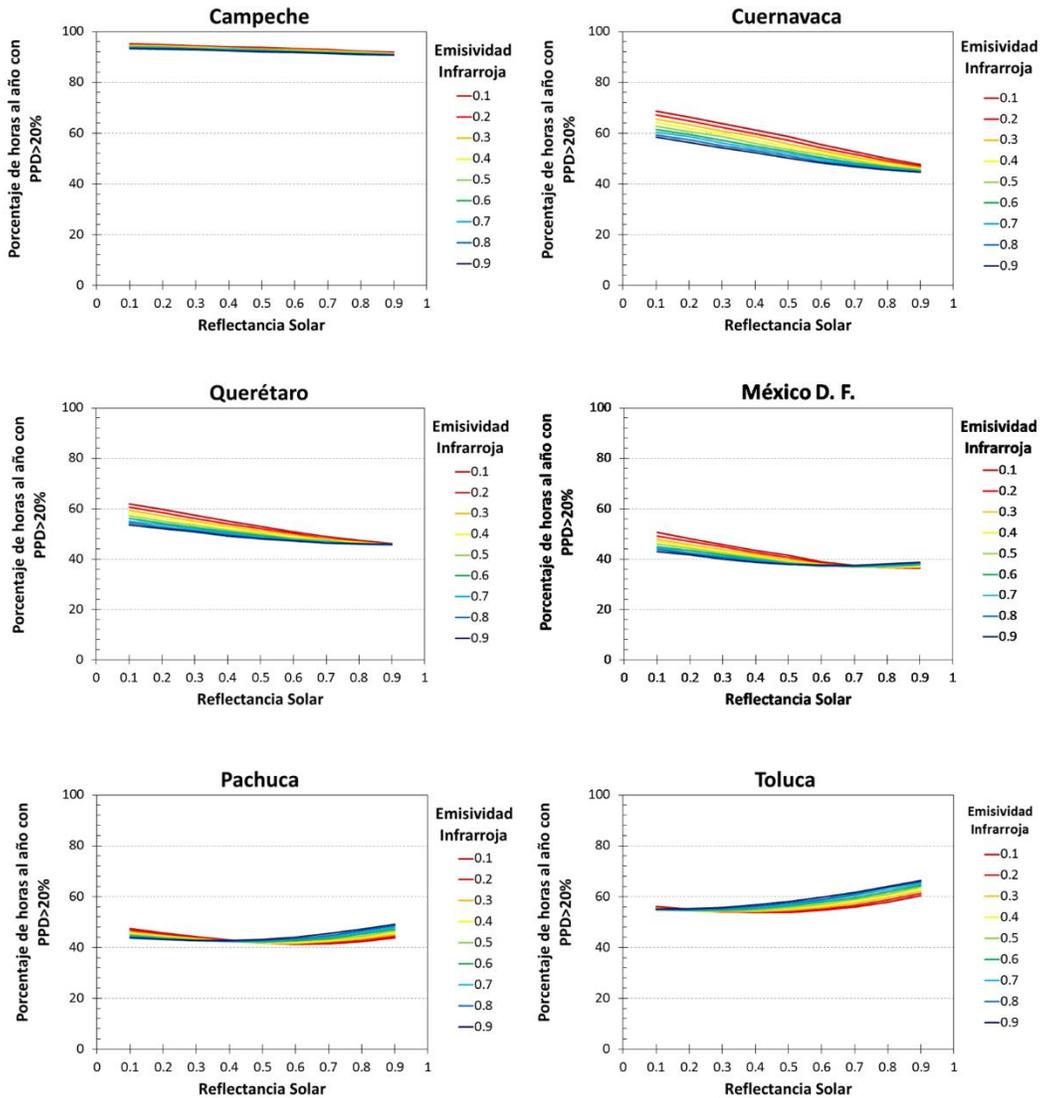


Figura 49. Patrones de la variación del Porcentaje de Horas No Confortables en función de la RS y EI, para el Edificio No Residencial.

Las combinaciones óptimas de RS y EI para reducir en lo posible las horas no confortables que se presentan durante todo el año son mostradas en las Figuras 51 a 53.

En lo que se refiere al caso base, las ciudades de las zonas térmicas 1 y 2, al igual que el caso de Costo Anual de la Energía, requieren de los mayores valores de RS y EI, en este análisis la combinación óptima para estas ciudades resulto en RS=0.9 y EI=0.9. Como se analizó en la sección 3.4.2., en algunas ciudades de estas zonas térmicas, como Acapulco y Hermosillo, la reducción del PHNC por efecto de la RS y EI es muy limitada, aunque la selección de recubrimientos con altos valores de RS y EI es importante para reducir el

número de horas con condiciones extremadamente no confortables, como se muestra en la Figura 50.

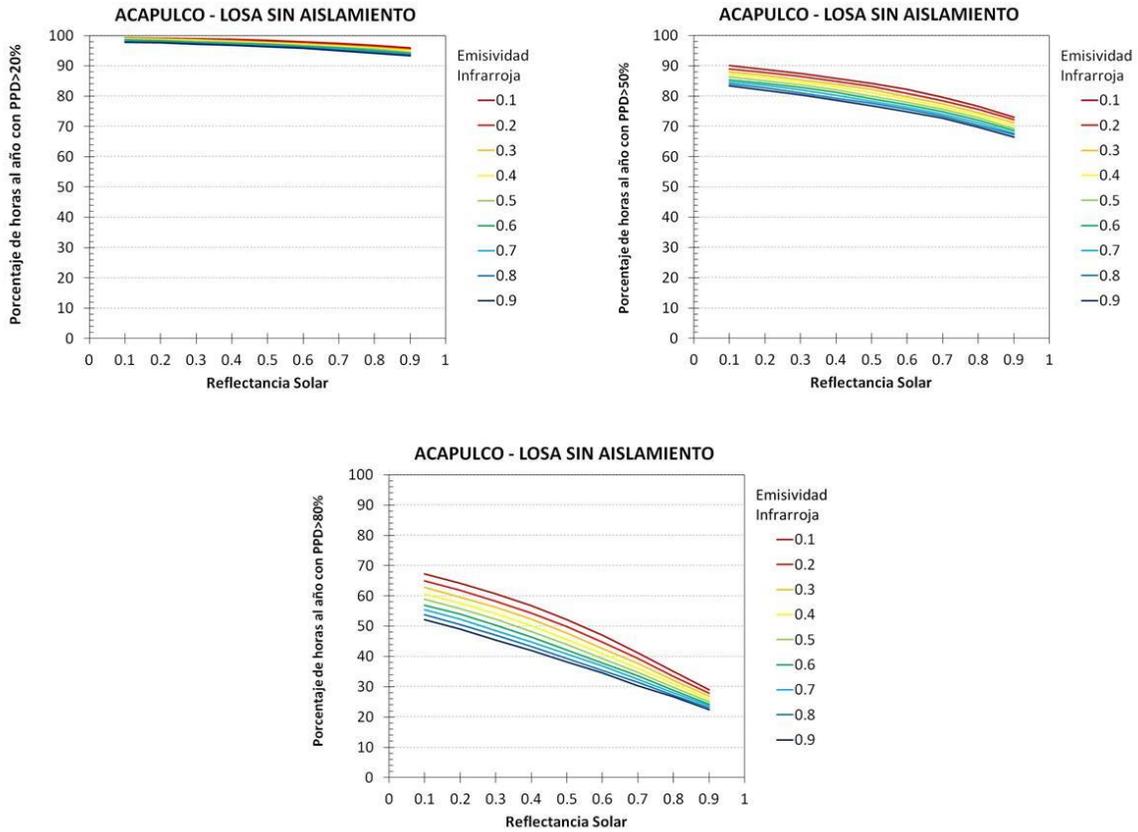


Figura 50. Patrones de la variación del porcentaje de horas con diferentes niveles de PPD en función de la RS y EI, para Vivienda de Interés Social.

La zona térmica 3 resultó con combinaciones óptimas que incluye bajos valores de EI y un rango de RS entre 0.7 a 0.9 para la Vivienda de Interés Social y el Edificio Residencial. En el caso del Edificio No Residencial, la combinación óptima consiste de bajos valores de EI, con excepción de Chihuahua, y un rango de RS entre 0.1 y 0.7.

Con la aplicación de aislamiento térmico en algunas ciudades de las zonas térmicas 3 y 4, los valores óptimos de la RS tienden a reducirse, mientras que la EI óptima tiende a incrementarse. En la mayor parte de las ciudades de las zonas térmicas 1 y 2, los valores de la combinación óptima tienden a ser más constante en los diferentes niveles de aislamiento térmico.

Vivienda de Interés Social – Confort Térmico

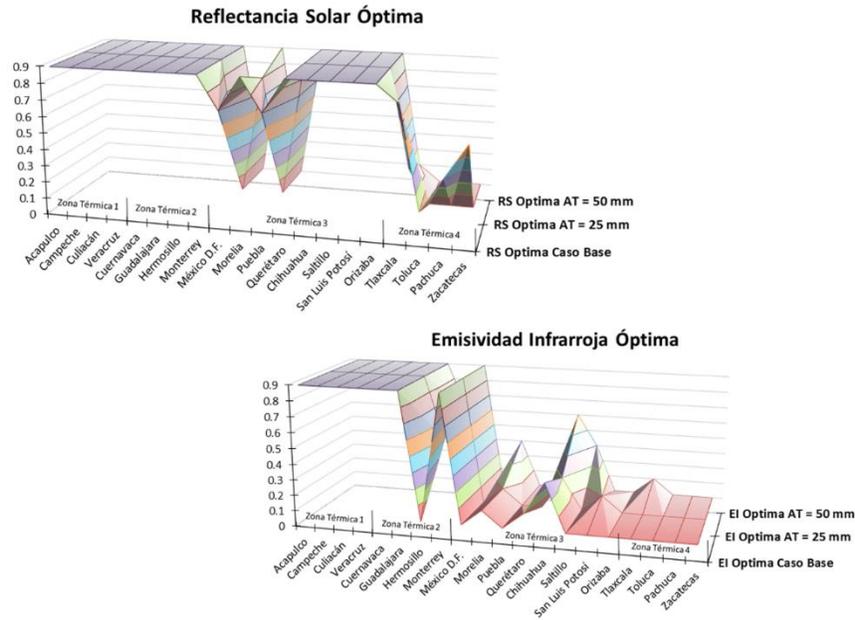


Figura 51. Combinaciones óptimas de RS y EI para el caso base y los dos niveles de aislamiento térmico en la Vivienda de Interés Social.

Edificio Residencial – Confort Térmico

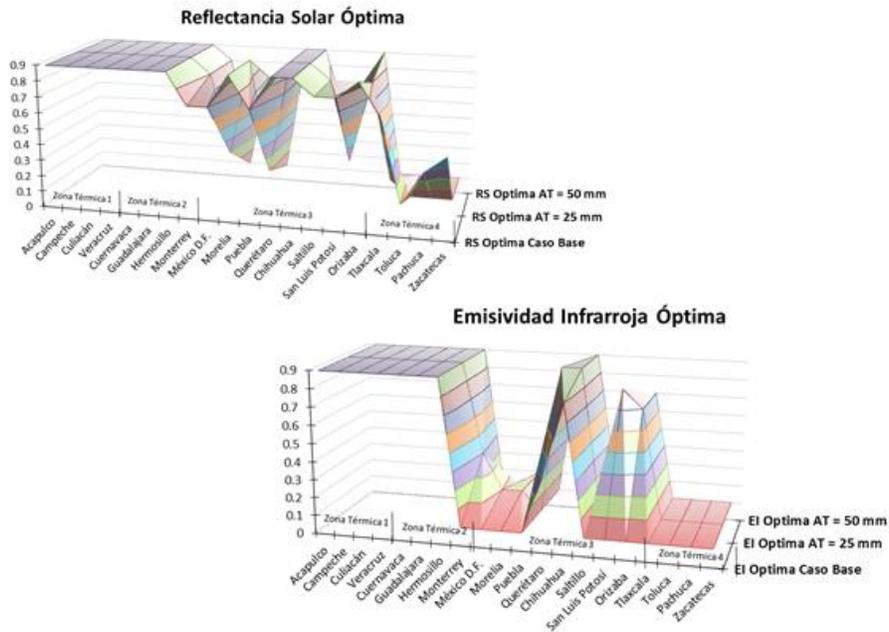


Figura 52. Combinaciones óptimas de RS y EI para el caso base y los dos niveles de aislamiento térmico en la Vivienda de Interés Social.

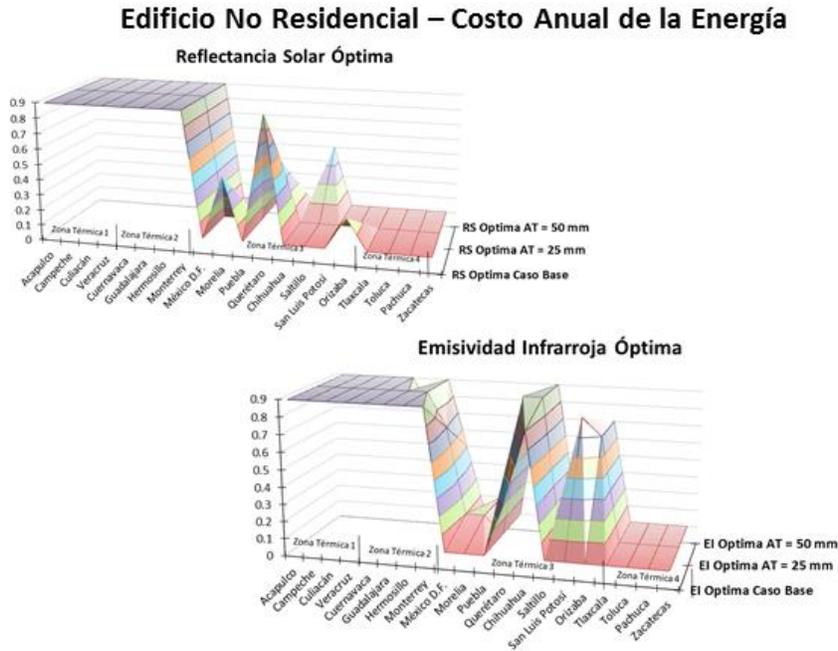


Figura 53. Combinaciones óptimas de RS y EI para el caso base y los dos niveles de aislamiento térmico en la Vivienda de Interés Social.

3.5. Discusión de los Resultados

3.5.1. Factor sobre el efecto de la RS y EI en el Uso de Energía.

Uno de los principales factores que determinan si una localidad tendrá o no tendrá un efecto significativo de la SR y el IE en el consumo anual de energía tiene que ver con la diferencia entre sus demandas de energía para la calefacción y la refrigeración. La figura 54 muestra la comparación entre las reducciones del CAE en las 20 ciudades contra la diferencia entre el promedio de consumo de electricidad para enfriamiento menos el promedio de consumo de electricidad para calefacción, ambos promedios se basan en los valores máximos y mínimos del CAE al variar SR y el IE.

Los valores positivos sobre el eje de las “x” indican que el consumo anual de electricidad para la refrigeración es mayor que para la calefacción, mientras que los valores negativos indican que el promedio del costo de energía para la calefacción es mayor que para la refrigeración. Una gran diferencia entre los consumos anuales de refrigeración y calefacción, resultará en una baja penalización de utilizar una combinación que es adecuada para el periodo dominante pero inadecuada para el otro periodo, esto se ve reflejado alta reducción AEC en el periodo dominante y un bajo aumento en el periodo no dominante. Por ejemplo, al utilizar altos valores de SR y el IE se reduce el consumo de

energía para la enfriamiento, sin embargo se presenta una penalización durante el invierno ya que hay un incremento del consumo de energía para calefacción.

Algunas ciudades se han identificado en la Figura 54, como en el caso de Acapulco, que muestra la mayor diferencia entre los promedios de consumo de energía para enfriamiento y calefacción, así como el mayor efecto de la RS y la EI sobre CAE. También muestra que la disminución en esta diferencia disminuye la reducción de AEC. Las reducciones más bajas de CAE corresponden a ciudades con diferencias entre los consumos energéticos para refrigeración y calefacción alrededor de la marca de -1,000 kWh, incluyendo Chihuahua, Zacatecas y Puebla. La reducción de la CAE se incrementa de nuevo en Toluca, cuya diferencia entre refrigeración y calefacción consumos es - 3.638 kWh.

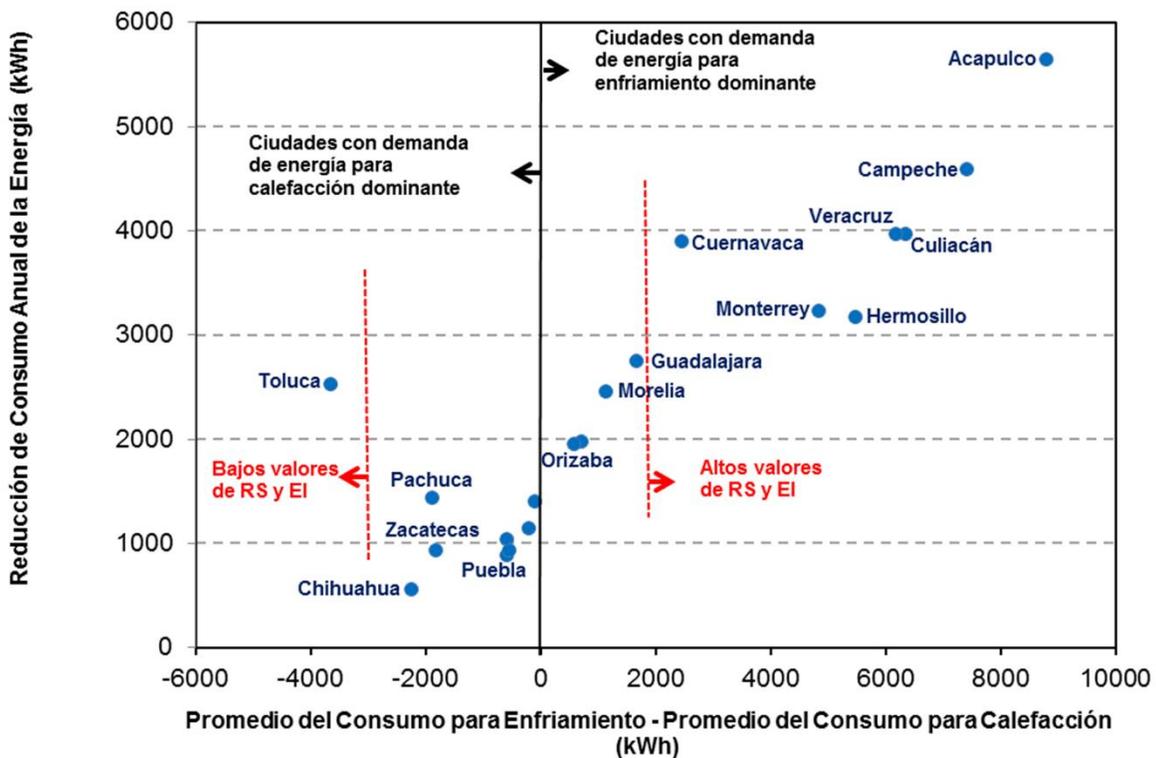


Figura 54. Comparación entre el Consumo Anual de la Energía y la diferencia entre los promedios de energía para enfriamiento menos energía para calefacción.

3.5.2. Factor sobre el efecto del AT sobre el Uso de Energía en climas cálidos.

De acuerdo con los resultados de este análisis, obtenido mediante simulación en TRNSYS, se resalta los limitados beneficios de aislamiento térmico sobre el consumo de energía en ciudades de clima cálido extremoso (zonas térmicas 1 y 2), particularmente cuando el techo tiene propiedades adecuadas de RS y EI. Esto se ha mostrado en las Figuras 27 a 29.

El aislamiento térmico provoca una resistencia a la conducción de calor hacia el interior de la edificación, el calor es almacenado en el aislamiento térmico se ve reflejado en una modificación en la temperatura de la superficie exterior del techo. Esta temperatura aumenta durante los periodos diurnos debido a las ganancias de calor por absorción de la radiación solar, y se reduce durante los periodos nocturnos debido a la radiación infrarroja emitida a la atmósfera. El aumento diurno de esta temperatura producirá una pérdida de calor adicional debido a un aumento en la transferencia de calor por convección hacia el aire exterior y emisión de radiación infrarroja hacia la atmosfera. Además la pérdida de calor durante la noche se reduce debido a la disminución de la temperatura de la superficie del techo.

Las Figura 55 muestra la tasa del flujo de calor combinando los mecanismos de convección y de radiación infrarroja que se produce en la superficie exterior del techo (Q_{ext}), tanto para el caso base y como para el techo con 25 mm de aislamiento térmico. Estos resultados corresponden a tres días típicos de verano en Acapulco. En esta Figura se compara el flujo de calor combinado para un techo con $RS=0.9$ y $RS=0.1$, ambos con $EI=0.9$.

Los valores negativos de Q_{ext} observados en la Figura 55 indican que en estas condiciones (verano en una Vivienda de Interés Social en Acapulco), la pérdida de calor a través del techo se produce durante todo el día. Las diferencias entre incremento de la pérdida de calor diurno y la reducción de la pérdida de calor nocturna representan los ahorros de energía para cargas térmicas debidas a 25 mm de aislamiento térmico.

Para los valores óptimos de las propiedades ópticas ($RS = 0.9$ y $EI = 0.9$), la reducción de la pérdida de calor que se producen durante los periodos nocturnos debido a los 25 mm de aislamiento térmico, tiene una magnitud similar a incremento de la pérdida de calor diurno. El incremento de la pérdida de calor diurna es 0.34 kWh/m^2 (área amarilla en la Figura 55a) y la reducción de la pérdida de calor nocturna es 0.25 kWh/m^2 (zona verde en la Figura 55a), ambos se determinaron mediante la integración de las tasas de flujo de calor para el segundo día (julio 20).

Para la superficie de un techo con $RS=0.1$ y $EI=0.9$, las magnitudes de flujo de calor aumentan significativamente. Por esta inadecuada combinación de propiedades ópticas, el aumento de la pérdida de calor diurno para el segundo día es igual a 1.97 kWh/m^2 (área amarilla en la Figura 55b) y la reducción de la pérdida de calor nocturna es 1.11 kWh/m^2 (zona verde en la Figura 55b). Usando una combinación óptima de SR y el IE, aislamiento térmico produce un ahorro de energía de tan sólo 0.09 kWh/m^2 para este día; mientras que

para una combinación con $SR = 0.1$, el ahorro de energía fue significativamente mayor: 0.87 kWh/m^2 .

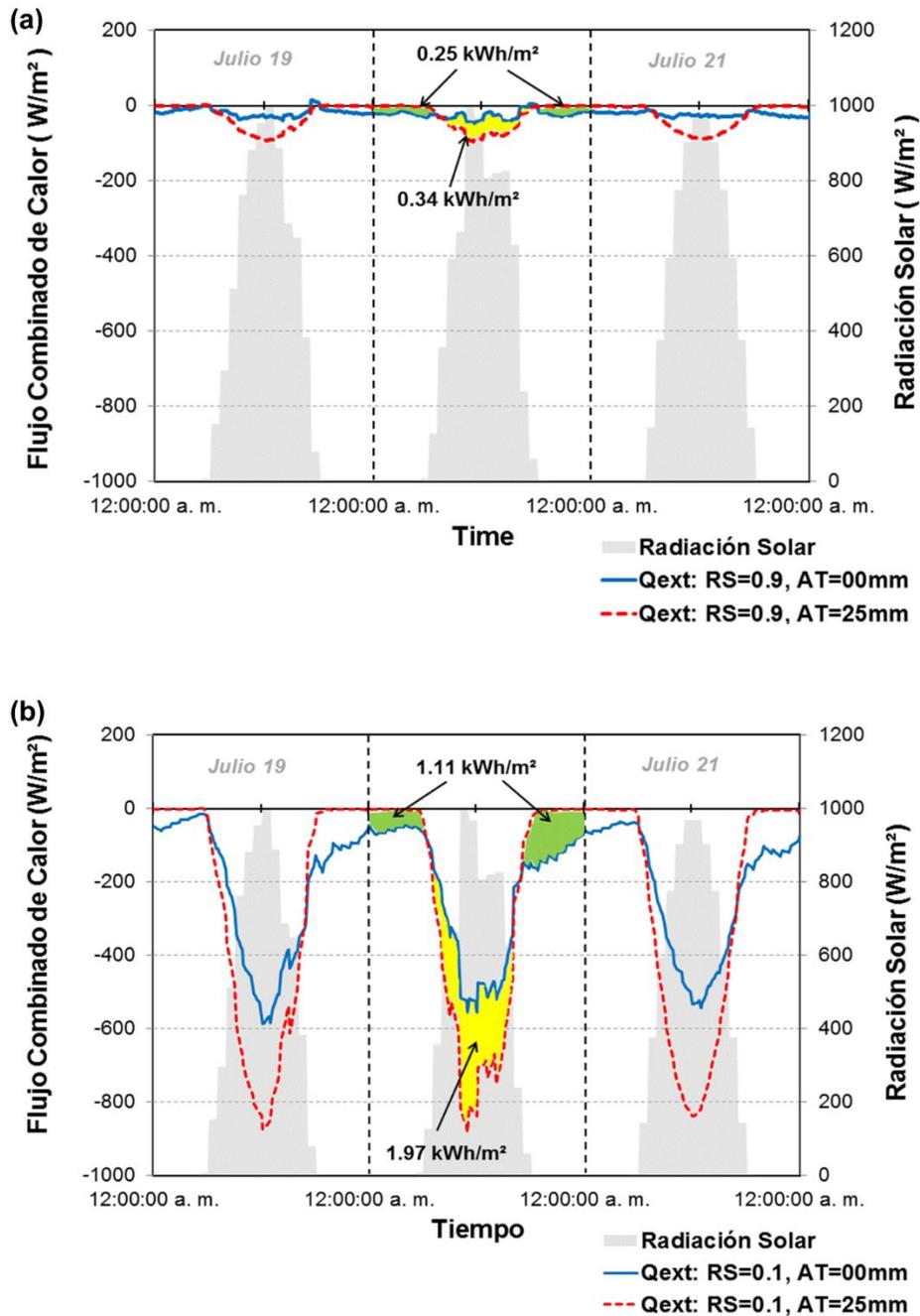


Figura 55. Comparación del Flux de Calor Combinado (Convección y Radiación Infrarroja) que ocurre en la superficie exterior del techo (Q_{ext}) para una losa sin aislamiento térmico y un techo con 25 mm de aislamiento térmico. (a) techo con Reflectancia Solar adecuada $RS=0.9$ y (b) techo con Reflectancia Solar inapropiada $RS=0.1$. Las gráficas muestran los resultados de tres días típicos de verano para la ciudad de Acapulco.

3.5.3. Factor sobre el efecto de la RS y EI en el Confort Térmico.

La variación en la RS y la EI del techo tiene un efecto sobre las temperaturas de la superficie interna del techo y del aire interior, ambas variables tienen una influencia directa sobre las condiciones de confort térmico.

Ciudades tales como Cuernavaca, Guadalajara y Morelia, exhiben temperaturas ambientales dentro o muy cercanas al rango de confort térmico. En estas ciudades se observa que las variaciones de la RS y EI ocasionan un alto efecto sobre el PHNC. Esto se debe a que techos con bajos valores de RS y EI ocasiona incrementos en la temperatura del aire interior suficientes para que un importante número de horas pasen a estar en condiciones fuera de la zona de confort, esto se ve reflejado en un incremento en el PPD. Por otro lado, si se utilizan valores altos de RS y EI, la temperatura del aire interior alcanza a permanecer en el rango de confort.

En las ciudades que se reportan con un bajo efecto de la RS y EI sobre el PHNC, tales como ciudades de la zona térmica 1, la temperatura ambiente se encuentra muy por arriba y lejos del rango de confort. Por ello, aun y cuando se utilicen valores altos de RS y EI, la reducción en la temperatura del aire interior que se alcanza por aumentar los valores en las propiedades ópticas, no es suficiente para lograr que un importante número de horas presenten una temperatura del aire interior dentro de la zona de confort.

La Figura 56 muestra la comparación de la temperatura del aire interior, entre la peor y la mejor combinación de RS y EI en la superficie exterior del techo. Esta comparación se realiza durante una semana típica de verano, para una ciudad con fuerte efecto de la RS y EI sobre el PHNC, como es el caso de Cuernavaca, y una ciudad con bajo efecto como el caso de Acapulco. Si se considera un rango confortable entre los 20°C y 25°C, se pueden observar como que en el caso de Cuernavaca la temperatura del aire exterior se mantiene cerca del rango de confort cuando se utiliza $SR=0.9$. Para un valor de $SR=0.1$, el incremento de la temperatura del aire interior, provocado por una mayor absorción de la radiación solar, es motivo para que se incremente notablemente el número de horas con una temperatura fuera del rango de confort térmico.

En la Figura 56, se observa que en la ciudad de Acapulco, la temperatura del aire interior se mantiene por arriba de la zona confortable tanto para una $RS=0.9$ como para una $RS=0.1$. La reducción de la temperatura del aire interior por cambiar de la peor a la mejor combinación de SR y EI es suficiente para la temperatura del aire interior se mantenga en la zona de confort para el caso de Cuernavaca, pero no suficiente para el caso de Acapulco.

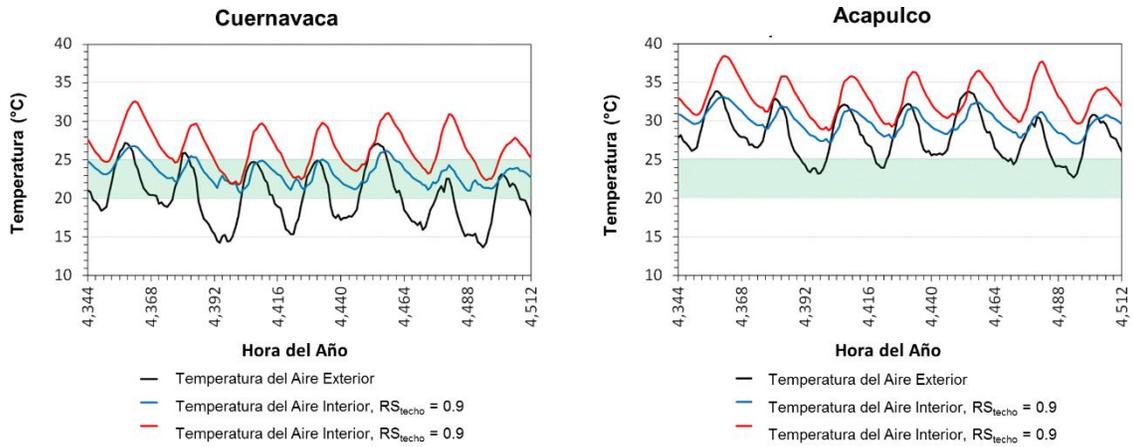


Figura 56. Comparación entre el Consumo Anual de la Energía y la diferencia entre los promedios de energía para enfriamiento menos energía para calefacción.

4. Conclusiones

En este trabajo se presenta una estimación cuantitativa del efecto de la reflectancia solar, emisividad infrarroja y aislamiento térmico de la parte exterior del techo sobre el costo anual de la energía y el porcentaje de horas no confortables que se presentan durante el año.

Los resultados muestran que las ciudades de clima cálido extremo con alto requerimientos de energía para enfriamiento, incluyendo las ciudades de la zona térmica 1, Hermosillo y Monterrey, presentan los mayores consumos anuales de energía, pero también presentan los mayores efectos de la RS y EI sobre el consumo energético. Esto ocurre particularmente para edificaciones con una superficie del techo relativamente grande, en comparación con la superficie de paredes verticales, como es el caso de la Vivienda de Interés Social y el Edificio Residencial. La combinación óptima en estas condiciones climáticas incluye altos valores de RS y EI. Estas ciudades muestran un bajo efecto de la RS y EI sobre el confort térmico, ya que la reducción de la temperatura del aire interior por utilizar altos valores de RS y EI no es suficiente para alcanzar condiciones estrictamente confortables, pero si hay una reducción de las horas extremadamente no confortables.

La ciudad de Chihuahua representa un caso donde se presentan altos consumos energéticos tanto en el periodo de enfriamiento como en el de calefacción. En este tipo de clima se presentan importantes penalizaciones en el consumo de energía por valores extremos de RS y EI, por lo que el efecto de las propiedades ópticas sobre el uso de energía y el confort térmico se ve reducido. En esta ciudad se observó un mayor efecto del aislamiento térmico sobre el uso de energía que el efecto mostrado por la RS y EI.

Toluca presenta una demanda dominante de energía para calefacción, por lo que su combinación óptima incluye bajos valores de RS y EI, esta ciudad presenta efectos importantes de las propiedades ópticas sobre el uso de energía y el confort térmico, ubicándose en un rango intermedio de las 20 ciudades analizadas.

Las ciudades que presentan una temperatura ambiental cerca del rango de confort, como Cuernavaca, Guadalajara y Morelia, resultaron con los mayores efectos de la RS y EI sobre el Porcentaje de Horas No Confortable.

Las ciudades de la zona térmica 3 y 4 presentan combinaciones óptimas con bajos valores de EI y un rango variable de RS. Mientras que las ciudades de las zonas térmicas 1 y 2, los valores más altos de RS y EI son los recomendados para una combinación óptima en los valores de las propiedades ópticas del techo. Normas sobre techos reflectivos son ampliamente justificables para ciudades de las zonas térmicas 1 y 2.

En forma generalizada, el uso de aislamiento térmico reduce el efecto de la RS y EI sobre el uso de energía y el confort térmico. Los beneficios de AT se presentan cuando no se tienen valores adecuados de RS y EI en la superficie exterior del techo, y estos beneficios son limitados para una combinación óptima de las propiedades ópticas. Solo algunas ciudades con importantes demandas de energía para calefacción, como Chihuahua y Toluca, se presentan reducciones importantes de Consumo Anual de la Energía por efecto del AT aun con la combinación óptima de RS y EI.

El uso de aislamiento térmico en techo con bajos valores de RS puede considerarse en ciertas situaciones donde se presenta un techo con alta pendiente y el uso de recubrimientos con altos valores de RS puedan provocar problemas de deslumbramiento o bien reflejar energía térmica-radiante que tenga efecto térmicos en otras edificaciones.

Referencias Bibliográficas

- Akbari, H., Konopacki, S., Pomerantz, M. 1999. Cooling energy savings potential of reflective roofs for residential and commercial buildings in the United States. *Energy* 21: 391-407.
- Akbari, H., Levinson, R. 2008. Evolution of Cool-Roof Standards in the US. *Advances in Building Energy Research* 2: 1-32.
- Akbari, H., Matthews, H.D. 2012. Global cooling updates: Reflective roofs and pavements. *Energy and Buildings* 55: 2-6.
- Akbari, H., Menon, S., Rosenfeld, A. 2009. Global cooling: increasing worldwide urban albedos to offset CO₂. *Climatic Change* 95.
- Akabri, H., Pomerantz, M., Taha, H. 2001. Cool Surface and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy* 70: 295–310.
- ASHRAE. 2009. *Fundamentals handbook of American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers*. Atlanta, GA, USA.
- Barrios, G., Huelsz, G., Rechtman, R., Rojas, J. 2011. Wall/roof thermal performance differences between air-conditioned and non-air-conditioned rooms. *Energy and Buildings* 43: 219–223.
- Boixo, S., Diaz-Vicente, M., Colmenar, A., Castro, M. 2012. Potential energy savings from cool roofs in Spain and Andalusia. *Energy* 38: 425-438.
- Bojórquez-Morales, G., Luna-León, A., Ruiz-Torres, P., Gómez-Azpeita, G., García-Cueto, R. 2011. Confort térmico y normatividad. *Memorias del XXXV congreso nacional de energía solar, ANES*. 369-374.
- Bozonnet, E., Doya, M., Allard F. 2011. Cool roofs impact on building thermal response: A French case study. *Energy and Buildings* 43: 3006-3012
- Campos A., L. 2011. Estudio de optimización de la eficiencia energética en viviendas de interés social. Programa de Energía Sustentable en México, componente edificación, GIZ.
- CMM. 2010. Edificaciones Sustentables Estrategia Sectorial para Lograr un Desarrollo Sustentable y de Baja Intensidad de Carbono en México. Centro Mario Molina, pp. 11-16.
- CRE. 2014. Precio Medio del Gas Natural. Comisión Reguladora de la Energía. <http://www.cre.gob.mx/articulo.aspx?id=169> Acceso el 12 de enero del 2015.
- De Buen, O. 2011. Eficiencia energética y energías renovables en la vivienda en México: Un Repaso. Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía.

- Dias, D., Machado, J., Leal, V., Mendes, A. 2014. Impact of using cool paints on energy demand and thermal comfort of a residential building. *Applied Thermal Engineering* 65: 273-281.
- Emmel, M. G., Abadie, M. O., Mendels, N. 2007. New External convective heat transfer coefficient correlations for isolated low-rise buildings. *Energy and Buildings* 39: 335-342.
- Evans, J. M. 2003. Evaluating comfort with varying temperatures: a graphic design tool. *Energy and Buildings* 35: 87-93.
- Fernández, X. 2011. Indicadores de eficiencia energética en el sector residencial. Taller de Indicadores de Eficiencia Energética en México. Secretaría de Energía.
- Gentle, A. R., Aguilar, J. L. C., Simth, G. B. 2011. Optimized cool roofs: Integrating albedo and thermal emittance with R-value. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 95: 3207-3215.
- Halverson, M.A., Stucky, D.J., Fredrich, M., Godoy-Kain, P., Keller, J.M., Somasundaran, S. 1994. Energy Effective and cost effective building energy conservation measures from Mexico. Pacific NW Laboratory, Richland, Washington.
- Hamdana, M. A., Yamina, J., Abdelhafezb, E. A. 2012. Passive cooling roof design under Jordanian climate. *Sustainable Cities and Society* 5: 26-29.
- Jo, J., Carlson, J., Golden, J., Bryan, H. 2010. An integrated empirical and modeling methodology for analyzing solar reflective roof technologies on commercial buildings. *Building and Environment*: 45, 453-460.
- Kaska, Ö., Yumrutas, R., Arpa, O. 2009. Theoretical and experimental investigation of total equivalent temperature difference (TETD) values for building walls and flat roofs in Turkey. *Applied Energy* 86: 737-747.
- Levinson, R., Akbari, H. 2010. Potential benefits of cool roofs on commercial buildings: conserving energy, saving money, and reducing emission of greenhouse gases and air pollutants. *Energy Efficiency* 3: 53-109.
- Levinson, R., Akbari, H., Konopacki, S., Bretz S. 2005. Inclusion of cool roofs in nonresidential Title 24 prescriptive requirements. *Energy Policy* 33: 151–170.
- Levinson, R., Akbari, H., Reilly, J. C. 2007. Cooler tile-roofed buildings with near-infrared-reflective non-white coatings. *Building and Environment* 42: 2591-2605.
- Lucero-Álvarez, J., Martín-Domínguez I. R., Rubín-Zacarías, F., Ledezma-Gallegos, Alarcón-Herrera, M. T. 2011. Experimental Comparison of Heat Flow through Concrete

- Roofing Flagstones with Different Coatings. ISES Solar World Congress, Kassel, Alemania.
- Martín-Domínguez, I. R. 2004. Desarrollo de un simulador para la optimización termo-económica de viviendas de interés social. Reporte Sistema de Investigación Regional SIVILLA. pp. 3-11.
- Menon, S., Akbari, H., Mahanama, S., Sednev, I., Levinson. R. Radiative forcing and temperature response to changes in urban albedos and associated CO₂ offsets. Environment Research Letter 5: 1-11.
- MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) Land group, 2012, http://neo.sci.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=MOD11C1_M_LSTDA
- NOM-C460-ONNCCE-2009. Norma Oficial Mexicana. Industria de la construcción – Aislamiento Térmico- Valor “R” para las envolventes de vivienda por zona térmica para la República Mexicana –especificaciones y verificación. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S. C.
- NOM-008-ENER-2001. Norma Oficial Mexicana. Eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios no residenciales. Secretaria de Energía.
- NOM-018-ENER-1997. Norma Oficial Mexicana. Aislantes térmicos para edificaciones. Características, límites y métodos de prueba. Secretaria de Energía.
- NOM-020-ENER-2011. Norma Oficial Mexicana. Eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios residenciales. Secretaria de Energía.
- Oleson, K. W., Bonan, G. B., Feddema, J. 2010. Effects of white roofs on urban temperature in a global climate model, Geophysical Research Letters 37.
- Oropeza-Pérez, I., Ostergaard, P. A. 2014. Global Energy saving potential of utilizing natural ventilation under warm conditions – A case study of Mexico. Applied Energy 130: 20-32.
- Ozel, M. 2012. The influence of exterior surface solar absorptivity on thermal characteristics and optimum insulation thickness. Renewable Energy 39:347-355.
- Palyvos, J. A. 2008. A survey of wind convection coefficient correlations for building envelope energy systems’ modeling. Applied Thermal Engineering 28: 801-808.
- Rosas-Flores, J. A., Rosas-Flores, D., Morillón Gálvez, D. 2011. Saturation, energy consumption, CO₂ emission and energy efficiency from urban and rural households appliances in Mexico. Energy and Buildings 43:10-18.

- Rosenfeld, A. H., Akbari, H., Bretz, S., Fishman B. L., Kurn, D. M., Sailor, D., Taha, H. 1995. Mitigation of urban heat islands: materials, utility programs, updates. *Energy and Buildings* 22: 255-265.
- Santamouris, M. 2014. Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy* 103: 682-703.
- SENER. 2014. Precio Medio de Electricidad, año 2014. Secretaría de Energía <http://egob2.energia.gob.mx/portal/electricidad.html> Acceso el 14 de enero del 2015.
- Shi, Z., Zhang, X. 2011. Analyzing the effect of the longwave emissivity and solar reflectance of building envelopes on energy saving in buildings in various climates. *Solar Energy* 85: 28-37.
- Simpson, J. R., McPherson, E. G. 1997. The effects of roof albedo modification on cooling loads if scale model residences in Tucson, Arizona. *Energy and Buildings* 25:127-137.
- SMN (Sistema Meteorológico Nacional). 2010. Resúmenes Históricos (Normales Climatológicas, Periodo 1981-200). http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=29&Itemid=93
- SODA (Solar Energy Service for Professionals). 2012. <http://www.soda-is.com>.
- Synnefa, A., Santamouris, M., Akbari, H. 2007. Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential building in various climatic conditions. *Energy and Buildings* 39: 1167-1174.
- Taha, H. 2008. Meso-urban meteorological and photochemical modeling of heat island mitigation. *Atmospheric Environment* 42: 8795-8809.
- Takebayashi, H., Moriyama, M. 2007. Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island. *Building and Environment* 42: 2971-2979.
- Zinzi, M., Agnoli, S. 2012. Cool and green roofs. An energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island techniques for residential buildings in the Mediterranean region. *Energy and Buildings* 55: 66-76.